Conseil national de recherches Canada
National Research Council Canada

Manuel de règles de sécurité pour l'hydrogène

Comité sur la sécurité de l'hydrogène

Canada

CNRC 27407

88-03216/

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHES CANADA

COMITÉ SUR LA SÉCURITÉ DE L'HYDROGÈNE

MANUEL DE RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR L'HYDROGÈNE

PAR

K.M. KALYANAM, DIRECTEUR DE PROGRAMME

GROUPE INDUSTRIEL

L'INSTITUT DES SYSTÈMES À HYDROGÈNE

ET

D. ROBERT HAY

DIRECTEUR TECHNIQUE

CONSEIL DE L'INDUSTRIE DE L'HYDROGÈNE

1987

Copyright 1987 par le
Conseil national de recherches du Canada

ISBN 0-660-92092-1 (Français)
ISBN 0-660-12529-3 (Anglais)

Des exemplaires de cette publication peuvent être obtenus par courrier sur paiement à l'avance, par chèque ou mandat, à l'ordre du Receveur Général du Canada - crédit du CNRC, à l'adresse suivante :

Bureau de vente et de diffusion des publications,
Conseil national de recherches
Ottawa (Ontario)
K1A 0R6

Prix : 12,00$

TABLE DES MATIÈRES

	Page
DÉNI DE RESPONSABILITÉ	3
REMERCIEMENTS	4
RÉSUMÉ	5
OBJECTIFS D'EXÉCUTION	6
1. SÉCURITÉ ET HYDROGÈNE	8
1.1 Introduction	8
1.2 Optique du public	9
1.3 Élaboration de critères de sécurité pour l'hydrogène	11
1.4 Manuel de règles de sécurité pour l'hydrogène	12
2. RISQUES PROPRES À L'HYDROGÈNE	13
2.1 Introduction	13
2.2 Dangers découlant des propriétés de l'hydrogène	13
2.3 Classification des dangers propres à l'hydrogène	16
2.3.1 Fuite/déversement accidentel	16
2.3.2 Combustion	17
2.3.3 Détonation	21
2.3.4 Réaction avec un oxydant, un halogène, un métal	24
2.3.5 Fragilisation des métaux	24
2.3.6 Asphyxie	33
2.3.7 Dangers cryogéniques	33
3. MESURES PRÉVENTIVES	39
3.1 Observation des codes, normes et règles	40
3.2 Limitation des quantités	41
3.3 Emplacement et séparation de l'équipement	42
3.4 Contrôle de l'accumulation d'hydrogène dans les enceintes	50
3.5 Suppression de l'air	50
3.6 Élimination des sources d'inflammation	51
3.7 Détection et contrôle des fuites	53
3.8 Endigage des déversements d'hydrogène liquide	53
3.9 Instrumentation	54
3.10 Détendeurs de sûreté	56
3.11 Évents et évacuateurs sécuritaires	57
3.12 Repérage, contrôle et extinction d'incendies	58
3.13 Choix de matériaux de construction convenables	60
3.14 Précautions aux basses températures	62
3.15 Identification et évaluation des dangers	64

		Page
4.	CODES, NORMES, RÈGLEMENTS ET RÈGLES RECONNUES	65
	4.1 Codes, normes et règlements aux États-Unis	66
	4.1.1 Stockage de l'hydrogène	67
	4.1.2 Distribution de l'hydrogène	67
	4.1.3 Transport de l'hydrogène	68
	4.2 Codes, normes et règlements au Canada	69
5.	IDENTIFICATION ET ÉVALUATION DES DANGERS (HAZOP ET HAZAN)	87
	5.1 Plan général d'identification des dangers	88
	5.2 Analyse et évaluation des dangers	92
	5.2.1 Analyse globale des défaillances	92
	5.2.2 Analyse logique des étapes menant à une défaillance	93
	5.2.3 Analyse des dangers ou Hazan	93
	5.2.4 Validité des méthodes Hazop et Hazan	94
6.	RÉFÉRENCES	96
7.	ANNEXES	
	Annexe A - Propriétés de l'hydrogène, du méthane et de l'essence	100
	Annexe B - Techniques de repérage des fuites et des incendies	103
	Annexe C - Bibliographie	107

DÉNI DE RESPONSABILILTÉ

Les auteurs, l'Institut des systèmes à hydrogène, le Conseil national de recherches et le Conseil de l'industrie de l'hydrogène ne pourront être tenus responsables des dommages pouvant découler de l'utilisation du contenu de ce manuel de règles de sécurité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les membres du Comité de sécurité de l'hydrogène du Conseil national de recherches pour leurs conseils et leur collaboration à la production de ce manuel. Il convient de souligner de façon particulière la contribution de M. Graeme Hayward, Directeur-général de l'Institut des systèmes à hydrogène, et celle de M. Don Kirkwood, membre du Comité de sécurité de l'hydrogène, de la Division linde de la Union Carbide du Canada Limitée, pour ses conseils judicieux et sa critique du document.

Ce document fut subventionné par l'Institut des systèmes à hydrogène, le Conseil national de recherches et le Conseil de l'industrie de l'hydrogène. Le projet fut mené à terme en étroite collaboration avec le Comité de sécurité de l'hydrogène du CNRC, composé des membres suivants des milieux de l'industrie, du gouvernement et de la recherche:

- M.L. Gardner, Conseil national de recherches Canada
- M.D. Robert Hay, Ph.D., Conseil de l'industrie de l'hydrogène
- M.G.W. Hayward, Institut des systèmes à hydrogène
- M.D. Kirkwood, Union Carbide du Canada Limitée
- M.R.E. Knowlton, Chemetics International Inc. (C.I.L.)
- M.H. Tamm, Ph.D., Énergie atomique du Canada Limitée

Le manuel a fait l'objet d'une étude finale par le Comité de sécurité du Conseil de l'industrie de l'hydrogène, composé de M.D. Robert Hay, directeur technique du CIH, M. Gerald Crawford, Ph.D., d'Electrolyzer Inc., et M. James Sprague, d'Air liquide Canada Limitée.

RÉSUMÉ

L'hydrogène est utilisé et manipulé en toute sécurité dans l'industrie depuis de nombreuses années. Cette sécurité est assurée en fonction des divers usages spécifiques de l'hydrogène. Les nouveaux procédés et nouveaux usages de l'hydrogène peuvent très bien résulter en de nouveaux dangers auxquels il faudra faire face. Ce "Manuel de règles de sécurité pour l'hydrogène" traite des conditions générales qui font que les propriétés particulières à l'hydrogène contribuent à créer des situations dangereuses, ainsi que des diverses techniques et méthodes industrielles d'identification, d'analyse, d'évaluation et d'élimination des dangers associés à l'hydrogène.

Le fait d'avoir produit ce type de document illustre bien que l'on a su tenir compte, au cours du développement des procédés industriels à l'hydrogène, de l'optique, des attentes et des exigences de la société en matière de sécurité, et les y intégrer.

OBJECTIFS D'EXÉCUTION

L'hydrogène est utilisé et manipulé en toute sécurité dans l'industrie depuis de nombreuses années. L'industrie des procédés l'utilise comme matière première et l'industrie aérospatiale comme carburant de première qualité. Par conséquent, on est habitué, à l'échelle industrielle, à manipuler de grandes quantités d'hydrogène et on n'entrevoit aucune difficulté sérieuse à son usage croissant dans les procédés industriels.

Les systèmes industriels à hydrogène ont depuis toujours été dans les mains de spécialistes de l'hydrogène et ont donc été isolés du grand public. Par contre, les nouveaux procédés et nouveaux usages de l'hydrogène pourraient très bien résulter en de nouveaux dangers auxquels il faudra faire face. Il est fort possible que l'hydrogène soit utilisé comme carburant de substitution, tout autant dans les domaines industriels et commerciaux que pour le transport et le chauffage résidentiel. Il faut absolument procéder à une sérieuse analyse de la sécurité avant de passer à un usage à grande échelle de l'hydrogène dans le domaine du transport, notamment pour les véhicules routiers où les gens peuvent être exposés à de sérieux dangers et où il s'avère difficile, voire impossible, de contrôler les modes de manutention. Par conséquent, les nouveaux programmes de développement de l'industrie de l'hydrogène dans les domaines sus-mentionnés auront pour effet d'accroître les usages de l'hydrogène et de porter de plus en plus les technologies de l'hydrogène à la connaissance du public. Le domaine de la sécurité reliée à l'hydrogène sera sujet à la critique de groupes locaux d'habitants des populations vivant à proximité des futures usines, ainsi que des groupes de travailleurs, agences gouvernementales et autres groupes professionnels et d'intérêt public. Il ne faut pas oublier que les média seront à l'affût des controverses et que la sécurité est certainement sujette à controverse.

Nous avons été témoins au cours du dernier siècle d'une augmentation de connaissances et d'un éveil social en matière de sécurité et ceci a eu pour effet d'accroître, aux yeux de la société, les exigences concernant la responsabilité pour la sécurité des personnes. Bien que l'on ait manipulé l'hydrogène en toute sécurité depuis des décennies dans le cadre de procédés industriels, il est important de bien faire savoir au spécialiste, comme au public, que les développements dans l'industrie de l'hydrogène n'ont pas

eu lieu sans y intégrer les diverses optiques en matière de sécurité, telles qu'exprimées ou anticipées par la société. Il est tout aussi important de faire comprendre au public que les règlements trop stricts ou les litiges onéreux ne peuvent qu'étouffer le développement de l'industrie de l'hydrogène et, par conséquent, priver la société des avantages uniques offerts par l'hydrogène.

Le "Manuel de règles de sécurité pour l'hydrogène" a été conçu en fonction de ces objectifs; en effet, il s'adresse aux producteurs, manutentionnaires (stockage et transport) et utilisateurs, actuels et futurs, d'hydrogène, ainsi qu'aux concepteurs de systèmes à hydrogène, et traite de sécurité sans référence aux diverses applications particulières. Il y est question des

- propriétés particulières à l'hydrogène qui contribuent à créer des situations dangereuses;

- techniques analytiques mises au point dans l'industrie des procédés pour en arriver à une identification et une évaluation systématiques et efficaces des dangers possibles, en vue de mettre en place des mesures préventives convenables; et

- règlements, codes, normes et règles industrielles qui ont été élaborés au cours des nombreuses années de production et de manutention d'hydrogène et adoptés par l'industrie pour parer aux dangers.

Le contenu de ce manuel se veut un outil qui aidera la communauté scientifique à satisfaire aux exigences de sécurité, tant au niveau professionnel qu'en fonction du grand public. En outre, le document illustre que l'on sait tenir compte de l'intérêt, des attentes et des exigences du public en matière de sécurité.

1. SÉCURITÉ ET HYDROGÈNE

1.1 INTRODUCTION

L'industrie de l'hydrogène est active depuis plusieurs décennies et n'a jamais été à l'origine d'accidents sérieux. Les systèmes industriels ont toujours été dans les mains de spécialistes de l'hydrogène et ont donc été isolés du grand public. Toutefois, les programmes de développement de l'industrie de l'hydrogène entraîneront une augmentation des usages de l'hydrogène et auront pour effet de porter de plus en plus les technologies de l'hydrogène à la connaissance du public. Le domaine de la sécurité reliée à l'hydrogène sera sujet à la critique de groupes locaux d'habitants des populations vivant à proximité des futures usines, ainsi que des groupes de travailleurs, agences gouvernementales et autres groupes professionnels et d'intérêt public. Il ne faut pas oublier que les média seront à l'affût des controverses et que la sécurité est certainement sujette à controverse.

Contrairement à certaines industries qui exploitent ou manipulent divers autres produits dangereux, l'industrie de l'hydrogène a l'avantage de ne pas être marquée par cette réputation d'être à l'origine d'effets négatifs latents sur la santé ou l'environnement. Mieux encore, l'hydrogène a bonne presse en ce qui a trait à l'environnement. Dans de telles conditions, il est possible d'axer les ressources sur la conception technologique et les méthodes d'évaluation des risques plutôt que de perdre du temps à des études plus nébuleuses sur les répercussions du produit, assorties de données de prise de décision douteuses et inutilisables, comme ce fut le cas dans l'industrie nucléaire et l'industrie de l'amiante, pour n'en nommer que deux. D'autre part, les sérieuses conflagrations industrielles dont nous avons été témoins ces dernières années au Mexique, aux Indes et en Grande-Bretagne, et leur couverture à outrance dans les média ont sensibilisé le public aux dangers que présentent les substances fortement explosives. Il faut tenir compte de cette perception du public avec circonspection dans tout projet et tout communiqué sur la sécurité. Les règlements trop stricts ou les litiges onéreux ne peuvent qu'étouffer le développement de l'industrie de l'hydrogène et, par conséquent, priver le public des avantages uniques offerts par

l'hydrogène. Il faut amorcer chez les professionnels une prise de conscience des valeurs chères à la société et de la perception qu'elle a des risques et poursuivre cette action en fonction des gens impliqués et du public en général.

1.2 OPTIQUE DU PUBLIC

Nous avons été témoins au cours du dernier siècle d'une augmentation de connaissances et d'un éveil social en matière de sécurité et ceci a eu pour effet d'accroître, aux yeux de la société, les exigences concernant la responsabilité pour la sécurité des personnes. Le long et ardu débat sur l'aspect de la sécurité des technologies nucléaires a eu de sérieuses répercussions sur la perception qu'a la société des dangers associés aux industries à forts risques. Les explosions survenues au Mexique et en Grande-Bretagne et la fuite de produits chimiques de Bhopal (Indes), en faisant la manchette, ont éveillé le grand public aux réalités des technologies à forts risques. Par contre, il ne faudrait pas oublier que la dernière décennie a permis de mieux maîtriser le processus d'évaluation des seuils de sécurité acceptables et de rassurer le public en matière de sécurité.

La loi américaine sur la qualité de l'air (Clean Air Act) constitue un bon exemple d'institutionnalisation des domaines de la santé et de la sécurité dans une société qui s'apparente fortement à la nôtre. Il n'est aucunement question de coûts économiques pour la détermination des critères primaires et secondaires de qualité de l'air (par exemple, la protection de la santé publique et la protection de l'environnement). Voilà un exemple patent de l'effet que peut avoir un public averti et soucieux de sécurité sur la teneur d'une loi.

Au cours de ces années de débats sur la sécurité, nous avons été témoins de l'émergence de personnes qui ont joué un rôle social important et qui ont su contribuer à l'élaboration de politiques en matière de sécurité. Bien sûr, il s'est avéré qu'un litige onéreux et interminable soit parfois nécessaire politiquement, mais les arrêts de développement et les frais reliés à ces litiges font que cette méthode n'est certainement pas efficace pour rassurer le public quant à la sécurité des grands projets industriels; il se peut que la société, les gouvernements et l'industrie puissent s'en passer.

Comme alternative, l'industrie doit tenter de démontrer, au grand public comme aux personnes impliquées socialement, que le développement industriel peut apporter des avantages sociaux. Elle devra tenir compte du souci de sécurité de la société et de sa perception des risques.

Le fameux litige public qui a entravé l'évolution de l'industrie de l'énergie nucléaire illustre bien le besoin d'adopter un nouveau mode de lancement des technologies à forts risques dans la société. L'industrie de l'énergie nucléaire a tout simplement omis de bien faire savoir au public qu'elle tenait compte, non seulement des exigences de sécurité purement techniques perçues par la communauté scientifique, mais bien du souci de sécurité de la société et de sa perception des risques propres à l'énergie nucléaire.

Pour bien rassurer le public en matière de sécurité reliée à l'hydrogène, il suffit de faire appel au principe de "sécurité avant tout". Les démarches suivantes sont essentielles:

- examen de conscience de l'industrie sous les aspects technologique et social;

- prise de conscience des perceptions de risques et soucis de securité actuels dans la société;

- leadership lorsque vient le moment de porter des jugements d'ordre moral;

- collaboration et leadership en matière d'élaboration de règlements et de codes;

- image d'une industrie qui a pour objectif d'améliorer les conditions de sécurité.

Même si l'hydrogène est utilisé depuis des décennies dans le cadre de procédés industriels, il est important de fournir, dans un contexte social sans cesse en évolution, des règles de sécurité de production, de manutention et d'utilisation de l'hydrogène à ses utilisateurs actuels et futurs. Il est également important de faire savoir au public que des moyens sont en place pour répondre à ses attentes en ce qui a trait à l'aspect de la sécurité des systèmes à hydrogène.

1.3 ÉLABORATION DE CRITÈRES DE SÉCURITÉ POUR L'HYDROGÈNE

Les industries de raffinage du pétrole, de produits chimiques, de pétrochimie et de carburants synthétiques font appel à de fortes quantités d'hydrogène depuis des décennies. Il s'ensuit que l'utilisation d'hydrogène dans l'industrie est devenue affaire de routine et que toute augmentation des quantités d'hydrogène utilisées dans les procédés industriels ne devrait pas être accompagnée de difficultés majeures. Pour la production d'énergie électrique, l'hydrogène gazeux sert à refroidir les bobines de rotor et de stator des grosses turbogénératrices, et ce avec succès depuis plus de quarante ans. L'hydrogène est devenu un carburant de prédilection de l'aérospatiale, où on l'utilise sans problèmes en grandes quantités. Des analyses préliminaires portant sur la sécurité des avions militaires et civils mus par l'hydrogène ont été entreprises et les dangers reliés à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant militaire ont fait l'objet d'études (1, 2, 33, 34).

Par contre, les nouveaux procédés et nouveaux usages de l'hydrogène pourraient très bien résulter en de nouveaux dangers auxquels il faudra faire face. Il est fort possible que l'hydrogène soit utilisé comme carburant de substitution, tout autant dans les domaines industriels et commerciaux que pour le transport et le chauffage résidentiel. Bien que l'on ait réussi à acheminer l'hydrogène par pipeline (sous forme de gaz comprimé) sur de grandes distances, on ne l'a jamais vraiment utilisé à des fins commerciales. A l'exception de quelques projets expérimentaux avec des automobiles, camions, autobus et avions, l'hydrogène n'a pas vraiment fait ses preuves comme carburant utilisé pour le transport. Il faut absolument procéder à une sérieuse analyse de la sécurité avant de passer à un usage à grande échelle de l'hydrogène dans le domaine du transport, notamment pour les véhicules routiers où les gens peuvent être exposés à de sérieux dangers et où il s'avère difficile, voire impossible, de contrôler les modes de manutention. L'hydrogène peut également satisfaire aux besoins en combustible pour le chauffage résidentiel, mais en ce qui a trait à la sécurité, on se pose toujours de sérieuses questions concernant les problèmes de détection des fuites de gaz et d'intensité d'explosions provoquées par des mélanges hydrogène-air dans des enceintes complètement ou partiellement isolées. Toutefois, au cours du siècle dernier, des gaz riches en hydrogène (gaz de houille, gaz de gazogène, gaz de ville, etc) étaient utilisés sans problèmes en Europe pour satisfaire aux besoins en combustible pour le chauffage résidentiel.

Il est nécessaire de procéder à une analyse détaillée de la sécurité en ce qui a trait aux futures utilisations possibles de l'hydrogène. Il faudra envisager des accidents plausibles, établir des données pertinentes concernant les dangers et procéder à une analyse et à une évaluation de ces dangers. Les aspects de la sécurité concernant l'hydrogène sont étroitement reliés à l'usage spécifique dont il fera l'objet et aux critères utilisés pour définir les accidents anticipés. Dans ce document, il est question de certains dangers reliés à l'hydrogène, sans faire appel à des usages ou à des critères de définition d'accident particuliers.

1.4 MANUEL DE RÈGLES DE SÉCURITÉ POUR L'HYDROGÈNE

Ce "Manuel de règles de sécurité pour l'hydrogène" s'adresse aux producteurs, manutentionnaires (stockage et transport) et utilisateurs, actuels et futurs, d'hydrogène, ainsi qu'aux concepteurs de systèmes à hydrogène; il se veut un outil important en matière de sécurité. Il y est question des propriétés particulières à l'hydrogène qui contribuent à créer des situations dangereuses et de méthodes efficaces visant à s'assurer que l'on obéit bien à des règles de sécurité.

L'objectif du manuel est de démontrer sans équivoque que le développement des procédés industriels à l'hydrogène n'a pas eu lieu sans y intégrer les points de vue importants exprimés par la société et a évolué en fonction des orientations futures de ces points de vue. Pour atteindre cet objectif, il est question:

- des propriétés particulières à l'hydrogène qui sont à l'origine de risques;
- de la nature des risques découlant de certaines propriétés;
- des méthodes qui permettent de contrer les risques;
- d'un certain nombre de méthodes pratiques pour contrer les risques;
- des diverses techniques actuelles d'identification, d'analyse et d'évaluation des dangers, ce afin de pouvoir proposer et adopter les méthodes qui permettront de contrer les risques associés aux systèmes à hydrogène.

Le manuel est un outil qui aidera la communauté scientifique à satisfaire aux exigences de sécurité, tant au niveau professionnel qu'en fonction du grand public. A sa lecture, les autres lecteurs pourront constater que les attentes et exigences globales de la société en matière de sécurité ne sont pas vaines.

2. RISQUES PROPRES À L'HYDROGÈNE

2.1 INTRODUCTION

Afin de concevoir, utiliser et exploiter des installations à l'hydrogène sécuritaires, il faut bien connaître les propriétés pertinentes de l'hydrogène et les dangers qui peuvent en découler, ainsi que la mise en application de techniques de sécurité reconnues. Il sera ici question des dangers ou des situations dangereuses pouvant découler des propriétés physiques ou chimiques de l'hydrogène. Le sujet est traité de façon à permettre au lecteur de se familiariser avec les risques propres à l'hydrogène et les méthodes qui permettent ou peuvent permettre d'atténuer ou d'éliminer ces risques.

2.2 DANGERS DÉCOULANT DES PROPRIÉTÉS DE L'HYDROGENE

Les nombreux textes sur l'hydrogène indiquent ce qui suit:

- l'hydrogène est le plus léger de tous les éléments;

- l'hydrogène est incolore, inodore, non toxique et sans saveur;

- l'hydrogène est un gaz inflammable dont la flamme est incolore s'il est pur;

- l'hydrogène s'apparente à d'autres combustibles sous plusieurs aspects, mais possède certaines propriétés qui lui sont propres et qui le rendent plus dangereux ou moins dangereux que ces autres combustibles;

- la relation entre une propriété de l'hydrogène et un danger spécifique dépend fortement des conditions de stockage ou d'échappement, ou des deux

Les propriétés pertinentes de l'hydrogène fournies à l'annexe A et les dangers qui peuvent en découler ont été analysés et résumés par J. Hord (1); ces propriétés et dangers sont comparés à ceux du méthane et de l'essence afin d'avoir une meilleure idée du degré de sécurité relatif associé à l'hydrogène. Les propriétés physiques pertinentes et propriétés reliées à la combustion de l'hydrogène qui pourraient affecter la sécurité sont énumérées aux tableaux 2.1 et 2.2 respectivement.

TABLEAU 2.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DE L'HYDROGÈNE

PROPRIÉTÉ	HYDROGÈNE*
Poids moléculaire	2,02
Point d'ébullition normal (PEN), °C	-253
Température critique, °C	-240
Pression critique, kPa	1300
Masse volumique de H_2 liquide à PEN, kg/m^3	70,8
Densité de H_2 liquide (Eau = 1,0)	0,07
Masse volumique en phase vapeur à PEN, kg/m^3	1,34
Densité en phase vapeur (Air à 16 °C = 1,0)	1,1
Masse volumique de H_2 gazeux, kg/m^3	0,0826
Densité de H_2 gazeux (Air = 1,0)	0,068
Vitesse de diffusion dans l'air, m/s	0,02
Vitesse ascentionnelle dans l'air, m/s	1,2 à 9,1
Chaleur de vaporisation à PEN, kJ/kg	446
Toxicité	Simple gaz asphyxiant

---

* Forme para

TABLEAU 2.2 PROPRIÉTÉS RELIÉES À LA COMBUSTION DE L'HYDROGÈNE

PROPRIÉTÉ	HYDROGÈNE
Chaleur de combustion brute (pouvoir calorifique supérieur), kJ/kg	141 800
Chaleur de combustion nette (pouvoir calorifique inférieur), kJ/kg	119 900
Limites d'inflammabilité, % vol. dans l'air	4,0 à 75,0
Limites de détonation, % vol. dans l'air	18,3 à 59,0
Teneur limite dans l'oxygène, % vol.	5,0
Energie d'inflammation minimale, mJ	0,02
Température d'inflammation dans l'air chaud, °C	671
Température de flamme dans l'air, °C	2000
Chaleur radiante de la flamme, %	17 à 25
Distance sûre maximale, mm	0,08
Vitesse de propagation de flamme dans l'air, m/s	2,7 à 3,4
Vitesse de l'onde de détonation dans l'air, m/s	1480 à 2150
Energie d'explosion, kg TNT/GJ	~ 160

2.3 CLASSIFICATION DES DANGERS PROPRES À L'HYDROGÈNE

De toutes les substances dangereuses, l'hydrogène, en raison de sa constitution chimique, possède des caractéristiques d'interaction uniques. En moyenne, ses propriétés ne le rendent pas plus dangereux ni moins dangereux que le méthane ou l'essence par exemple, car comme toute substance dangereuse, il faut le manipuler en tenant compte des propriétés qui lui sont propres.

Par définition, danger signifie risque ou péril imminent. Les dangers propres à l'hydrogène peuvent être regroupés en différentes catégories:

- Fuite/déversement accidentel;
- Combustion;
- Détonation;
- Réaction avec un oxydant, un halogène, un métal;
- Fragilisation des métaux;
- Asphyxie; et
- Dangers cryogéniques.

2.3.1 Fuite/déversement accidentel

Une fuite ou un déversement accidentel constitue un danger car il peut en découler un mélange hydrogène-air combustible ou explosif. En raison de sa faible masse atomique et de son faible rayon atomique, l'hydrogène gazeux ou liquide est plus difficile à contenir que les autres fluides. Il diffuse rapidement dans les substances poreuses et certains métaux chauds rouge. Un contenant étanche à l'air n'est pas nécessairement étanche à l'hydrogène.

La vitesse d'écoulement des liquides ou des gaz qui fuient constitue une caractéristique importante d'évaluation des dangers d'incendie. La vitesse de fuite volumétrique est inversement proportionnelle à la viscosité absolue ou à la racine carrée de la masse spécifique. A l'aide des données de l'annexe A, on peut évaluer les vitesses de fuite volumétriques relatives des combustibles liquides à PEN et des gaz à PTN. Dans de telles conditions, la

vitesse de fuite volumétrique de l'hydrogène liquide sera de 2,4 à 8,5 (écoulement visqueux) fois supérieure à celle du méthane liquide et de 3,1 à 15 (écoulement visqueux) fois supérieure à celle de l'essence liquide; la vitesse de fuite volumétrique de l'hydrogène gazeux sera de 1,3 (écoulement visqueux) à 2,8 fois supérieure à celle du méthane gazeux et de 0,6 (écoulement visqueux) à 7,3 fois supérieure à celle des vapeurs d'essence. Puisque l'on veille habituellement à réduire le plus possible les fuites des fluides, les écoulements visqueux revêtent une importance pratique particulière. En conclusion, la vitesse de fuite de l'hydrogène par les soudures fendillées, les brides mal raccordées, les raccords filetés, les joints défectueux, etc, est habituellement plus élevée que pour les autres combustibles. En outre, l'hydrogène liquide est beaucoup plus difficile à contenir que le méthane liquide ou l'essence liquide et les vapeurs d'essence à PTN sont plus difficiles à contenir que l'hydrogène à PTN ou le méthane à PTN. En dépit de ces mauvaises caractéristiques de fuite, l'industrie a démontré que l'hydrogène gazeux et l'hydrogène liquide peuvent être facilement contenus en toute sécurité.

2.3.2 Combustion

Le danger le plus sérieux en matière de manutention d'hydrogène est celui de la combustion accidentelle. Pour avoir danger de combustion, il faut un mélange inflammable du fluide dangereux et de l'air et une source d'inflammation.

Inflammabilité: Les trois propriétés qui influencent l'inflammabilité sont la vitesse ascentionnelle, la vitesse de diffusion et les limites d'inflammabilité. Chacune de ces propriétés fait que l'hydrogène est plus inflammable que le méthane et l'essence. Les limites d'inflammabilité des mélanges hydrogène-air et hydrogène-oxygène dépendent de la pression initiale, de la température et de la teneur en vapeur d'eau. Avec l'air sec à pression atmosphérique, la limite inférieure est de 4,1 % par volume et la limite supérieure de 74,2% par volume. Avec l'oxygène sec à pression atmosphérique, ces limites sont de 4,7% et 93,9% par volume. La vitesse à laquelle l'hydrogène se mélange à l'air dépend de la vitesse de diffusion et de la vitesse ascentionnelle. L'hydrogène qui s'échappe dans une enceinte atteindra sa limite inférieure d'inflammabilité de 4% par volume 3,78 fois

plus rapidement que le méthane (limite inférieure de 5,3%). En raison de vitesses d'écoulement et ascentionnelle élevées, l'hydrogène se répand rapidement dans le milieu ambiant; il atteindra des concentrations de combustion plus rapidement et affectera un plus grand volume en un temps donné. Toutefois, l'énergie qui peut être libérée d'une enceinte par un incendie ou une explosion n'est que le quart de l'énergie libérée par un mélange à 5% de méthane dans l'air. Sans inflammation, l'hydrogène atteint sa limite supérieure d'inflammabilité dans l'air de 75% et devient "sûr" moins rapidement que le gaz naturel (limite supérieure de 15%); il faut à l'hydrogène 1,6 fois plus de temps. La faible valeur de la teneur limite dans l'oxygène est le reflet de la forte valeur de la limite d'inflammabilité supérieure de l'hydrogène. Par conséquent, la probabilité d'avoir une combustion causée par une source d'inflammation quelconque est supérieure pour l'hydrogène qui fuit dans un espace restreint, comparativement à celle du gaz naturel. Toutefois, en raison de ses grandes vitesses de diffusion et ascentionnelle, l'hydrogène se disperserait plus rapidement dans un espace ouvert. Il s'ensuit que le danger d'incendie est plus grave pour l'hydrogène qui fuit dans un espace ouvert qu'il ne l'est pour le gaz naturel ou l'essence mais il persiste moins longtemps.

Susceptibilité à la combustion/détonation: Avec des propriétés comme une grande vitesse de propagation de flamme, une faible énergie d'inflammation et une faible distance d'extinction de flamme, l'hydrogène est plus dangereux que d'autres fluides combustibles comme l'essence ou le méthane. Un écart plus grand entre les limites d'inflammabilité, notamment une faible limite inférieure sensiblement égale à celle du méthane mais inférieure à celle de plusieurs autres gaz combustibles, fait que l'hydrogène est très susceptible à la combustion. Ce qui n'aide pas non plus, c'est que l'énergie d'inflammation et la température d'inflammation de jet chaud de l'hydrogène sont inférieures à celles de l'essence et du méthane. Ceci signifie que l'hydrogène peut être enflammé par une source thermique aussi faible qu'une étincelle provoquée par l'électricité statique. Par contre, la haute température d'inflammation de l'hydrogène le rend moins dangereux. Les températures d'inflammation des mélanges hydrogène-air et hydrogène-oxygène varient quelque peu selon la composition, la pression, la teneur en vapeur d'eau et la température initiale. A pression atmosphérique, la température d'inflammation des mélanges hydrogène-air et hydrogène-oxygène se situe entre 565 et 578 ^{0}C. La vitesse

de combustion supérieure du mélange hydrogène-air signifie qu'il peut mieux soutenir la transition déflagration-détonation dans de longs tunnels ou de longs tuyaux. Les données concernant la distance d'extinction de flamme indiquent que la distance nécessaire pour empêcher la propagation d'une flamme libre dans le mélange hydrogène-air n'est que de 30% fois celle du mélange méthane-air. Il est donc plus difficile de concevoir des pare-flamme pour l'hydrogène; les cribles ne peuvent être utilisés et il faut utiliser des blocs métalliques frittés. Pour l'hydrogène, le maximum de distance sûre expérimentale (MDSE) , qui est le maximum de distance entre deux brides permettant d'empêcher la propagation d'une explosion d'une enceinte à un mélange inflammable entourant l'enceinte, n'est que le 1/15 de celle du méthane. Par conséquent, il est plus difficile d'éliminer ou de confiner les flammes et les explosions causées par l'hydrogène.

Inflammation spontanée: La température d'inflammation spontanée de l'hydrogène est de 858 K (586 ^{0}C); elle est de 813 K pour le méthane et de 501 à 744 K pour l'essence. Bien que cette température soit plus élevée pour l'hydrogène, sa faible énergie d'inflammation le rend plus susceptible à l'inflammation. En raison de sa plus faible température d'inflammation en air chaud, l'hydrogène est plus facilement enflammé par des jets de produits de combustion chauds provenant d'une enceinte voisine ou d'une surface chaude. Au delà de 560 ^{0}C, il y aura combustion ou détonation spontanée de l'hydrogène, selon sa teneur. Par conséquent, toute fuite d'hydrogène résultant du bris d'un contenant haute pression peut fort bien être accompagnée de l'inflammation spontanée du mélange hydrogène-air, suivie d'une conflagration qui durera jusqu'à l'épuisement de la quantité d'hydrogène dans le contenant. Cette affirmation repose sur un grand nombre de données expérimentales (1). Pour cette raison, il faut éviter d'amorcer la soupape de bouteille d'hydrogène comprimé avant de la raccorder au régulateur ou détenteur de pression (contrairement à ce que l'on fait habituellement pour d'autres bouteilles de gaz comprimé) car il pourrait y avoir inflammation spontanée de l'hydrogène qui s'échappe (7).

Aux températures et pressions usuelles, la plupart des gaz (par exemple, l'oxygène, l'azote, le bioxyde de carbone) subissent une chute de température par suite d'une détente au ralenti. Tel n'est pas le cas pour l'hydrogène;

celui-ci subit alors une hausse de température. Il s'agit là de l'effet Joule-Thomson inverse. Toutefois, cette augmentation de température n'est pas forte - environ 5,5 ^{0}C (10 ^{0}F) de 13,9 MPa (2000 lbs/po^{2} manom.) à la pression atmosphérique (7).

Dommages causés par le feu: Les grandes vitesses de diffusion et ascentionnelle de l'hydrogène le font se disperser assez rapidement au-delà des concentrations de combustion. La chaleur dégagée par un feu d'hydrogène est quelque peu plus intense que celle qui est dégagée par un feu d'hydrocarbures mais sa durée n'est que du 1/5 au 1/10 de celle du feu d'hydrocarbures (pour des volumes équivalents de combustibles déversés) (1). En raison de la tendance de l'hydrogène à monter, les dommages causés par un feu d'hydrogène couvrent une moins grande superficie. En outre, la grande vitesse ascentionnelle de l'hydrogène (en raison de sa faible masse) fait que l'hydrogène qui brûle, contrairement aux hydrocarbures liquides et aux gaz plus lourds, a tendance à s'élever et couvre de moins grandes surfaces au sol.

Comme nous l'avons mentionné, l'hydrogène liquide est beaucoup plus difficile à contenir que le gaz naturel liquide; sa vitesse de fuite volumétrique est de 2,4 à 8,5 (écoulement visqueux) fois supérieure à celle du gaz naturel liquide. La température de la vapeur de méthane qui se dégage du méthane liquide déversé accidentellement doit augmenter de près de 55 ^{0}C avant de devenir moins dense que l'air et se disperser. Par contre, l'hydrogène liquide n'a besoin que d'une augmentation de quelques ^{0}C pour s'élever dans l'air aux conditions atmosphériques normales. Les valeurs plus élevées de vitesse de vaporisation et vitesse de combustion volumétriques d'une mare d'hydrogène liquide indiquent que la durée d'un feu d'hydrogène sera plus faible. Le maximum d'énergie thermique radiante provenant d'un feu alimenté par une mare de combustible est évalué à 276 W/cm^{2} pour l'hydrogène et 155 W/cm^{2} pour le méthane. Par conséquent, on peut s'attendre à ce qu'il fasse plus chaud à proximité d'un feu d'hydrogène qu'à proximité d'un feu de méthane.

En ce qui a trait aux dommages causés par le feu, les paramètres importants sont la radiation thermique, l'engloutissement par les flammes (boule de feu), l'inhalation de fumée, la détection et l'extinction de l'incendie. La température de la flamme d'hydrogène dans l'air est légèrement supérieure à

celle du méthane. Près du quart de la chaleur fournie par ces flammes d'hydrogène et de méthane est transmise par radiation. Cette énergie thermique radiante est quelque peu absorbée par la vapeur d'eau de l'air, mais à un degré moindre pour la flamme de méthane. Les dommages causés par une boule de feu découlent directement de la combustion de substances amorcée au contact des flammes ou par engouffrement par les flammes qui brûlent le mélange hydrogène-air.

Détection d'incendie: Comme nous venons de le mentionner, la détection d'un incendie alimenté par l'hydrogène n'est pas de tout repos. L'hydrogène brûle dans l'air en dégageant une flamme bleu pâle qui est difficile à déceler le jour. Les impuretés et l'humidité de l'air la rendent plus visible et les petits feux peuvent être décelés la nuit, mais plus souvent qu'autrement, le chatoiement thermique s'avère la seule indication visible de danger. Le coefficient d'émission de flamme de l'hydrogène, c'est-à-dire la quantité de chaleur irradiée pendant la combustion, est faible dans l'air et a pour effet de réduire la quantité de chaleur transmise par radiation et les dangers d'inflammation secondaire et de brûlures.

En résumé, en tant que substance combustible, l'hydrogène possède plusieurs qualités qui lui sont propres. De façon générale, il est susceptible à la combustion mais se disperse assez rapidement au-delà des concentrations de combustion. Sa flamme est propre, pratiquement invisible et s'élevera à la verticale plutôt que de s'étendre à l'horizontale. Il faut adopter des mesures particulières en ce qui a trait à sa susceptibilité à l'inflammation par étincelle et aux difficultés que l'on éprouve à déceler sa combustion.

2.3.3 Détonation

La détonation est une explosion très puissante accompagnée de surpressions très élevées et de sérieux dangers de blessure par les débris projetés. La déflagration est une explosion moins puissante accompagnée de surpressions faibles et comportant moins de dangers de blessure par les débris projetés. Les limites de détonation et l'intensité de la source d'inflammation constituent des paramètres importants pour évaluer les dangers d'explosion des mélanges combustible-air. Plus l'écart est grand entre les limites de

détonation, plus les probabilités de détonation sont fortes. Les limites d'inflammabilité déterminent les concentrations de mélanges combustible-air combustibles et il peut y avoir des déflagrations entre ces limites. Les sources d'inflammation peu intenses (thermiques) amorcent des déflagrations dans les systèmes fermés et ouverts; toutefois, une déflagration peut fort bien se transformer en détonation dans un système fermé, sous l'influence des parois. Les sources d'inflammation intenses (ondes de choc) ont tendance à amorcer des détonations dans les systèmes combustible-air ouverts ou fermés. Les allumettes, étincelles, surfaces chaudes et flammes libres sont vues comme des sources d'inflammation faibles (thermiques), tandis que les détonateurs, contenants qui éclatent, la TNT, les éclairs sont des sources d'inflammation intenses (ondes de choc). L'hydrogène offre des limites de détonation plus écartées et une énergie d'inflammation plus faible que le méthane ou l'essence; par conséquent, il représente le plus grand danger d'explosion des trois.

A l'aide des données de l'annexe A, on s'aperçoit que l'hydrogène est un combustible plus explosif que le méthane et l'essence, si on utilise la masse comme base de comparaison, mais il l'est moins que les deux autres si on compare à l'aide des volumes. La capacité explosive volumétrique de l'hydrogène liquide est environ le 1/3 et le 1/6 de celles du méthane liquide et de l'essence liquide, respectivement. L'énergie explosive de l'hydrogène gazeux est environ le 1/3 et le 1/20 de celles du méthane gazeux et de l'essence gazeuse, respectivement.

Les paramètres de combustion qui influencent les dangers d'incendie influencent également les dangers d'explosion. La partie frontale de la flamme de l'hydrogène semble accélérer dans les longues enceintes. La distance expérimentale d'induction de détonation dans l'air à PTN (distance nécessaire pour qu'une déflagration se transforme en détonation) est de L/D = 100 pour l'hydrogène; ceci signifie que pour L/D > 100, il y aura fort probablement détonation des mélanges hydrogène-air en présence d'une source d'inflammation. Nous ne possédons pas de données analogues pour les mélanges méthane-air à combustion plus lente mais on croit que ces mélanges passeront de la déflagration à la détonation si le tuyau est assez long et si son diamètre est assez grand. Les surpressions qui accompagnent les déflagrations à l'air libre sont habituellement minimes. La surpression et

les dangers de blessure par les débris projetés dans les enceintes habituelles (L/D < 30) sont sensiblement égaux pour les mélanges hydrogène-air et méthane-air; dans les longs tunnels, etc, l'hydrogène offre un plus fort danger d'explosion.

Dommages causés par l'explosion: Les explosions qui sont accompagnées de surpressions et de débris projetés sont habituellement caractérisées en termes de quantité équivalente de TNT calculée. La capacité explosive par kJ de pouvoir calorifique stocké (basé sur la chaleur de combustion) est de 0,17 g TNT/kJ pour l'hydrogène et de 0,19 g TNT/kJ pour le méthane. Par consequent, pour une même énergie stockée, l'hydrogène offre une capacité explosive théorique légèrement inférieure. En outre, tel que nous l'avons mentionné, l'hydrogène, sur une base de masse, est plus puissant mais l'est moins sur une base volumétrique. Il faut insister sur le fait qu'une partie seulement de cette énergie explosive théorique sera libérée s'il y a explosion a l'air libre, la raison est qu'il est pratiquement impossible de déverser accidentellement ou de libérer une grande quantité de combustible et d'avoir ensuite un mélange complet avec l'air qui offre les bonnes proportions avant l'inflammation. Le peu de données expérimentales sur le sujet ne permettent pas d'evaluer avec précision l'énergie explosive qui sera fort probablement libérée par suite d'un déversement accidentel et de l'inflammation de l'hydrogène et du méthane. Les valeurs d'énergie d'explosion fournies à l'annexe A doivent être considérées comme des valeurs maximales théoriques, un facteur d'émission de 10% est jugé sensé pour les explosions combustible-air.

Certains critères relatifs aux boules de feu, à la radiation accompagnant un incendie et à la surpression d'explosion, conçus spécifiquement pour l'hydrogène, sont illustrés aux figures 3.3-1 et 3.3-2. Il s'agirait là de critères conservateurs pour le méthane (et l'essence). Les figures sont basées sur des possibilités de dangers d'incendie et d'explosion dans des aires de stockage et d'expérimentation non barricadées et ne sont pas représentatives des normes de stockage industriel. Les normes de stockage d'hydrogène dans l'industrie, telles qu'illustrées à la figure 3.3-3, sont beaucoup moins sévères.

En résumé, à cause du plus grand écart des limites de détonation, l'hydrogène représente un plus grand risque de dommages causés par l'explosion que le méthane ou l'essence. Lorsque les concentrations d'hydrogène dans l'air atteignent les concentrations de combustion, le mélange peut facilement être enflammé par une source d'énergie aussi faible qu'une étincelle causée par la présence d'électricité statique; il peut y avoir alors déflagration dans un système ouvert ou fermé et cette déflagration peut fort bien se transformer en détonation dans un système fermé. Les sources d'inflammation intenses ont tendance à amorcer des détonations dans les systèmes ouverts ou fermés. L'aération des enceintes fermées, surtout à proximité du plafond où le gaz s'accumule, constitue une mesure préventive essentielle contre les effets de la combustion ou de l'explosion.

2.3.4 Réaction avec un oxydant, un halogène, un métal

Sous l'aspect chimique, l'hydrogène est essentiellement un réducteur. Il réagit violemment avec les oxydants et les halogènes (fluor, chlore, brome et iode). Sa réactivité diminue du fluor à l'iode. Il s'agit de réactions explosives, notamment celles qui surviennent avec le fluor et le chlore, et il faut être très prudent dans de tels cas. Nombreux ont été les accidents connus découlant d'explosions hydrogène-chlore. Il y a un sérieux danger d'incendie et d'explosion.

La réactivité de l'hydrogène avec les métaux varie selon le métal. Il y aura formation d'hydrures métalliques avec les alcalis, les alcalino-terreux et la plupart des terres rares. De fait, il n'y a pas de réaction chimique mais l'hydrogène est plutôt absorbé et lié à la surface. L'hydrogène absorbé diffuse par la suite dans la masse du métal. La chaleur d'absorption exothermique et la chaleur de désorption endothermique se comparent à des chaleurs de réaction. L'hydrogène a bel et bien un effet physique néfaste sur les métaux cristallins.

2.3.5 Fragilisation des métaux

Les atomes d'hydrogène qui diffusent directement dans les interstices du métal peuvent perturber la structure cristalline et affecter les propriétés physiques du métal ou de l'alliage en question. Certains types d'acier sont

très susceptibles à ce phénomène et il peut alors y avoir formation de soufflures, fissuration ou "fragilisation par l'hydrogène". Si le métal ou l'alliage est utilisé pour contenir l'hydrogène, son affaiblissement ou bris ultérieur pourra être à l'origine de fuites qui constitueront des dangers d'explosion.

La désignation "fragilisation par l'hydrogène" est vague: on l'utilise pour décrire une variété d'effets de l'hydrogène sur les propriétés physiques et mécaniques des métaux. Les mécanismes à l'origine des effets de la fragilisation par l'hydrogène sont mal connus. On sait que la taux et le degré de fragilisation par l'hydrogène sont influencés par la concentration interne d'hydrogène, la pression d'hydrogène à l'extérieur, la température, le degré de pureté de l'hydrogène, les types d'impuretés, l'intensité des tensions, le taux de tension, la composition du métal, la limite élastique du métal à la traction, la grosseur des grains, la microstructure et les traitements thermiques antérieurs.

Les mécanismes de fragilisation par l'hydrogène étant souvent mal connus, la majorité des études sur la fragilisation par l'hydrogène décrivent les effets du phénomène plutôt que les causes. Les effets de la fragilisation peuvent être divisés en plusieurs catégories différentes; des études différentes décrivent souvent les mêmes effets en des termes différents. Voici une description des effets de la fragilisation par l'hydrogène, regroupés selon sept catégories identifiées à l'aide des désignations proposées dans le cadre d'une étude entreprise par les laboratoires Battelle (5):

o Ouverture du réseau cristallin

o Fissures d'éclatement, écailles et éclisses

o Fragilisation chimique par l'hydrogène

o Formation de soufflures

o Perte de ductilité

o Fissuration par tensions dues à l'hydrogène

o Fragilisation par l'hydrogène ambiant

Les six premières catégories ont trait à des effets découlant de la présence d'hydrogène dans le métal (hydrogène en solution). La dernière (fragilisation par l'hydrogène ambiant) décrit l'effet de l'adsorption d'hydrogène à la surface du métal. Nous décrirons maintenant en détail ces sept effets de fragilisation.

1. Ouverture du réseau cristallin: tout métal qui est soumis à de fortes pressions d'hydrogène peut devenir plein de petites fentes et fissures. Dans des conditions extrêmes, le métal devient même perméable aux liquides et aux gaz. Les mécanismes de cet effet de fragilisation sont mal connus. Néanmoins, ce type de fragilisation n'a jamais été observé à des pressions d'hydrogène inférieures à 30 000 lbs/po^2.

2. Fissures d'éclatement, écailles et éclisses: les fissures d'éclatement , les écailles et les éclisses peuvent apparaître au cours de la fabrication des métaux. Les mécanismes de cet effet de l'hydrogène comprennent le piégeage d'hydrogène moléculaire dans le réseau cristallin au cours du refroidissement du métal.

3. Fragilisation chimique par l'hydrogène: l'effet de l'érosion chimique des métaux par l'hydrogène est l'apparition de fissures qui entraînent une perte de résistance et de ductilité. Les mécanismes de cet effet de fragilisation sont connus. L'hydrogène réagit avec le carbone du métal pour former du méthane gazeux. La molécule de méthane étant trop grosse pour diffuser dans la structure du métal, elle devient piégée dans des vides. Le méthane gazeux ainsi piégé peut produire une pression qui fera apparaître des fissures. On sait que les conditions et propriétés physiques suivantes affectent le taux ou le degré de fragilisation chimique par l'hydrogène, ou les deux:

- o les hautes pressions partielles d'hydrogène favorisent la fragilisation chimique par l'hydrogène;

- o le taux de fragilisation chimique par l'hydrogène augmente avec la température;

- o le taux et le degré de fragilisation chimique par l'hydrogène sont directement affectés par la teneur en carbone de l'acier. De façon générale, le taux et le degré de fragilisation augmentent avec la teneur en carbone;

- o l'effet de la fragilisation chimique par l'hydrogène sur les métaux augmente avec la grosseur des grains du métal;

- o l'évolution antérieure de la température du métal affecte la fragilisation chimique par l'hydrogène. De façon générale, le façonnage à froid des métaux augmente leur susceptibilité à ce type de fragilisation;

- o la présence de certaines impuretés dans l'hydrogène favorise la fragilisation chimique par l'hydrogène. Par exemple, l'humidité, le sulfure d'hydrogène et le monoxyde de carbone font augmenter le taux de fragilisation;

- o Divers éléments d'alliage dans les aciers permettent de réduire l'effet chimique de l'hydrogène sur le carbone en formant des carbures très stables. Les éléments les plus utilisés à cette fin sont le thorium, le zirconium, le tantale, le néodymium, le titane, le chrome, le vanadium, le tungstène et le molybdène.

Ces règles sont habituellement présentées sous forme de graphiques (graphiques de Nelson) température-pression partielle d'hydrogène. La figure 2.3.1 est un exemple de graphique de Nelson illustrant les conditions de calcul sûr pour l'acier au carbone habituel et l'acier au carbone allié au molybdène. Les régions en-dessous et à gauche des courbes sont les zones de calcul sûr pour les diverses compositions des métaux. Tel qu'indiqué à la figure 2.3.1, l'acier au carbone habituel peut très bien résister à de très hautes pressions d'hydrogène (supérieures à 1 000 lbs/po^2) à des températures inférieures à 500 ^{o}F.

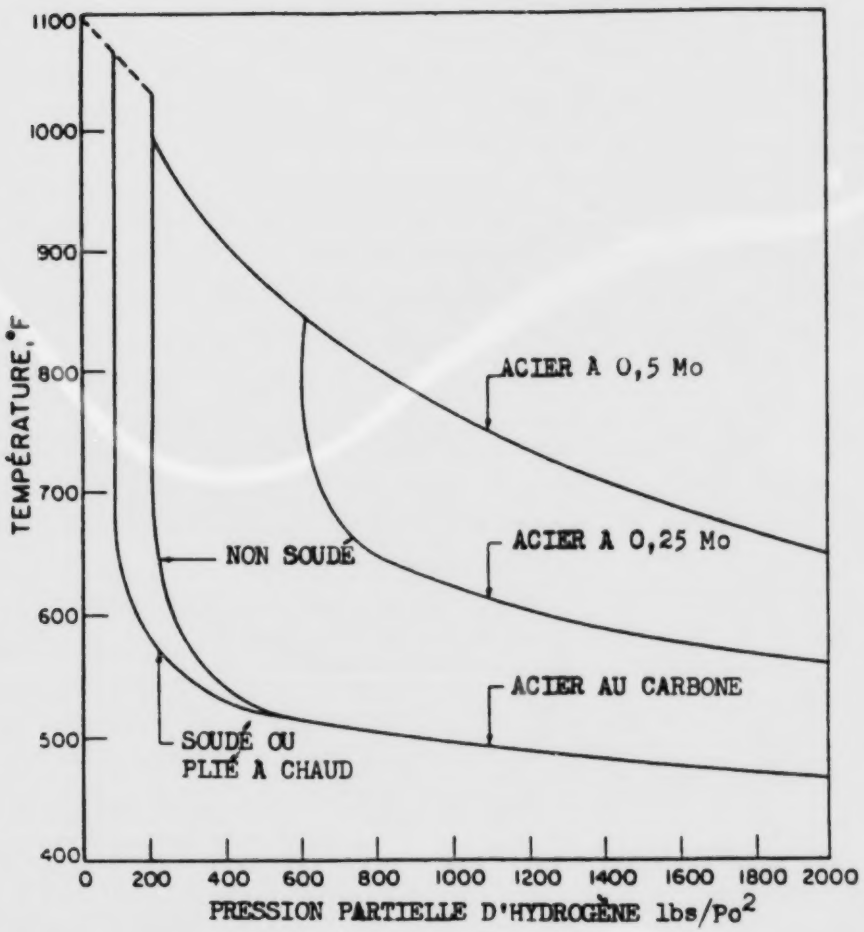


Figure 2.3.1 Graphique de Nelson des conditions de calcul sûr pour l'acier au carbone habituel et l'acier au carbone allié au molybdène (5)

4. Formation de soufflures: la formation de soufflures est un autre effet de fragilisation par l'hydrogène dont les mécanismes sont assez bien connus. L'hydrogène atomique diffuse assez rapidement dans la plupart des structures cristallines des métaux. Par contre, l'hydrogène moléculaire ne diffuse pas et peut devenir piégé dans la structure. Lors de la formation des soufflures, l'hydrogène atomique diffuse vers un vide ou défaut de la structure et s'y recombine en hydrogène moléculaire, ce qui fait cesser sa diffusion. Si tel est le cas, la pression interne aux vides contenant l'hydrogène moléculaire augmente et atteint une valeur de beaucoup supérieure à la pression partielle de l'hydrogène ambiant. Il y a alors rupture mécanique. Les facteurs suivants contribuent à augmenter la formation de soufflures dans les métaux exposés à l'hydrogène:

- o les imperfections internes du métal (feuilletage, inclusions de scorie, cordons d'inclusions) sont des sites de recombinaison d'hydrogène atomique en hydrogène moléculaire et contribuent à augmenter la formation de soufflures dans les métaux;

- o la corrosion à la surface du métal et certains contaminants de surface (comme le sulfure d'hydrogène) contribuent à augmenter la concentration d'hydrogène atomique en surface et contribuent donc à accroître la concentration interne d'hydrogène atomique;

- o la chute rapide de la température du métal favorise la formation d'hydrogène moléculaire et entraîne des effets de soufflures plus intenses.

La formation de soufflures peut constituer une difficulté dans le cadre de certaines applications de l'hydrogène. Ce problème peut être contrôlé en utilisant des métaux de grande qualité (avec le moins de défauts possible), en surveillant et en réduisant le plus possible la corrosion de surface et en contrôlant avec soin les cycles de température.

5. Perte de ductilité: en présence de très fortes concentrations internes d'hydrogène atomique, certains métaux (notamment les aciers à haute résistance) démontrent une diminution d'élongation sous traction, d'aire sous traction et d'effort de rupture. Dans des conditions extrêmes, il arrive que le

métal soit incapable de résister à la rupture dans les zones de tensions élevées près d'échancrures et de variations d'aire de section droite. Les mécanismes de perte de ductilité sont mal connus. Cet effet de perte de ductilité peut fort bien résulter d'une combinaison d'autres effets de fragilisation par l'hydrogène. On sait que les facteurs suivants ont pour effet d'augmenter la perte de ductilité des métaux:

- la limite élastique à la traction de l'acier affecte l'intensité de perte de ductilité. De façon générale, plus cette résistance est élevée, plus il perd de ductilité en présence d'hydrogène;

- la perte de ductilité devient très forte aux endroits où il y a des imperfections et des inclusions. La présence d'échancrures entraîne également une plus forte perte de ductilité;

- les fortes concentrations internes d'hydrogène atomique (par conséquent, à forte pression extérieure d'hydrogène) font augmenter la perte de ductilité;

- la dureté du matériau de construction est également un facteur. Les endroits durs, notamment à proximité des soudures, sont très susceptibles à la perte de ductilité,

- la perte de ductilité est très forte aux températures intermédiaires (sensiblement à la température de la pièce) et l'est moins aux températures supérieures ou inférieures à la température de la pièce;

- le taux d'effort exercé sur le métal influence également l'importance de la perte de ductilité en présence d'hydrogène. La perte de ductilité est très forte pour de faibles taux d'effort;

- le façonnage à froid d'un métal fait augmenter sa susceptibilité à la perte de ductilité en présence d'hydrogène.

Par conséquent, la conception des installations à l'hydrogène devrait faire appel, dans la mesure du possible, aux aciers à faible résistance élastique à la traction, à une détrempe et un soudage appropriés et à l'élimination d'échancrures, de brusques variations de température et de mouvements de température de part et d'autre de la température de la pièce.

6. Fissuration par tensions dues à l'hydrogène: voici un effet de fragilisation pour lequel les fissures apparaîssent et se développent dans l'acier à haute résistance soumis à des tensions en présence d'hydrogène atomique en diffusion.

Les mécanismes de cette fragilisation sont mal connus mais les conditions expérimentales suivantes sont nécessaires pour qu'il y ait ce type de fragilisation:

a) les métaux doivent avoir une résistance élastique à la traction supérieure à environ 110 000 lbs/po^2;

b) l'acier doit être soumis à un minimum d'effort de traction soutenu. Ce minimum dépend de la résistance de l'acier et de sa teneur en hydrogène;

c) l'acier doit contenir de l'hydrogène atomique en mouvement dans la structure cristalline en réponse à une concentration de gradients de tension.

Les facteurs qui font augmenter la fissuration par tensions dues à l'hydrogène sont entre autres les suivants:

o la fissuration est très forte aux soudures et endroits durs;

o la fissuration est très forte dans les aciers à forte résistance élastique à la traction;

o le niveau et le taux d'effort sur l'acier affectent ce type de fragilisation. De façon générale, un taux d'effort élevé entraîne une diminution de la vitesse de déplacement de l'hydrogène atomique dans le réseau cristallin;

o les charges cycliques rendent un métal plus susceptible à la fissuration par tensions dues à l'hydrogène;

o la présence de sulfure d'hydrogène et de bioxyde de carbone semble entraîner une augmentation de fissuration par tensions dues à l'hydrogène des métaux.

Cette fissuration peut être atténuée en ajoutant de faibles quantités de monoxyde de carbone, de vapeur d'eau ou d'oxygène à l'hydrogène; l'oxygène en très faibles concentrations a permis d'éliminer presque complètement ce genre de fragilisation. Certains chercheurs ont établi que le fait d'allier les aciers à certains métaux permet de réduire le phénomène de fissuration, mais le phenomène observé est plutôt mal défini.

7 Fragilisation par l'hydrogène ambiant: la fragilisation par l'hydrogène ambiant est un phénomène de surface qui fait apparaître de vilaines fissures a la surface du métal. Les mécanismes de ce phénomène sont mal connus mais on a etabli expérimentalement deux conditions nécessaires au phénomène.

1) le métal doit être exposé à l'hydrogène ambiant. Cette fragilisation n'est pas affectée par l'hydrogène atomique interne;

2) en plus d'être exposé à l'hydrogène ambiant, le métal doit être déformé plastiquement

Les effets de la fragilisation par l'hydrogène ambiant sont réversibles et ne dependent aucunement de la concentration d'hydrogène dans le métal. Cette fragilisation dépend, jusqu'a un certain point, de la pression de l'hydrogène. Toutefois, le fait d'accroître la pression de l'hydrogène par petits échelons n'augmente pas vraiment le taux de fragilisation par l'hydrogène ambiant. Cette fragilisation est beaucoup plus prononcée aux échancrures, défauts et variations d'aire de section droite. Peu de données ont été publiées sur la relation entre cette fragilisation et la température.

La présence de faibles quantités d'oxygène permet d'éliminer presque complètement cette fragilisation, même si les métaux ont été fortement déformés. En concentration aussi faible que 1 ppm, l'oxygène entraîne une faible réduction de la fragilisation. En concentration de 1% par volume, l'oxygène élimine complètement cette fragilisation dans les métaux déformés.

En résumé, il est évident que bien que l'on possède un grand nombre de données qui permettent de contrer la fragilisation des métaux par l'hydrogene, il faudra pousser nos études plus à fond afin d'en connaître les

divers mécanismes. Le degré de fragilisation semblerait dépendre de paramètres comme le type d'alliage, les niveaux d'effort en place, les impuretés dans l'hydrogène, et plusieurs autres non identifiés. La plupart des cas de fragilisation par l'hydrogène observés comportaient de l'hydrogène pur. Les défaillances découlant de la fragilisation ont très souvent été associées aux soudures et non au métal même. Les faibles quantités d'oxygène, de monoxyde de carbone et d'autres gaz sont efficaces pour prévenir la fragilisation par l'hydrogène ambiant. Ces impuretés pourraient peut-être servir dans le cadre de la plupart des usages énergétiques ou industriels de l'hydrogène.

2.3.6 Asphyxie

L'hydrogène n'est pas toxique mais il peut mener à l'asphyxie en déplaçant l'oxygène de l'air. L'inhalation d'air qui contient une concentration suffisante d'hydrogène peut entraîner la perte de conscience sans symptômes précurseurs (comme l'étourdissement par exemple). L'air qui contiendrait une concentration d'hydrogène inférieure à celle qui entraîne la perte de conscience serait inflammable.

L'hydrogène est un combustible qui brûle proprement. Les sous-produits de combustion de l'hydrogène dans l'air (azote et eau) sont des produits qui ont déjà été en contact avec nos poumons, tout comme les sous-produits fuligineux de combustion des hydrocarbures ou d'autres produits chimiques. Ceci élimine tout danger d'intoxication par inhalation de fumée de sous-produits. Toutefois, les poumons peuvent être affectés par l'inhalation de vapeurs surchauffées. Comme c'est le cas pour tout incendie, il y a également danger d'asphyxie lorsque des concentrations trop riches en hydrogène ou en sous-produits de combustion de l'hydrogène sont inhalées pendant un certain temps.

2.3.7 Dangers cryogéniques

Les cinq propriétés importantes en matière de sécurité de manutention de l'hydrogène liquide sont énumérées au tableau 2.3. Nous discuterons ci-dessous des dangers cryogéniques reliés au stockage et à la manutention de l'hydrogène liquide.

Augmentation de pression excessive dans le contenant d'hydrogène liquide: pour toute substance cryogénique, le grand rapport de volume de liquide au volume de gaz à température de la pièce (ou la forte pression nécessaire à la masse spécifique de liquide à la température ambiante) est à l'origine d'un mécanisme de forte augmentation de pression dans des contenants clos. Le faible point d'ébullition normal (20,3 K pour l'hydrogène liquide à l'équilibre) signifie qu'il y a une force thermique intense dont le rôle est de transférer la chaleur du milieu avoisinant à l'hydrogène liquide. Puisqu'il n'existe pas de matière isolante parfaite, il ne reste qu'à réduire au minimum cette alimentation en chaleur (ou la contrer par une réfrigération supplémentaire). En outre, la faible chaleur latente volumique de vaporisation signifie que de très grandes quantités de liquide stocké seront évaporées par unité d'énergie fournie. Il est essentiel d'évacuer le gaz de réduction ainsi produit (habituellement à l'atmosphère). Si ce gaz n'est pas évacué, la pression augmentera jusqu'à l'ouverture d'une soupape de sûreté, jusqu'au niveau d'équilibre des pressions ou jusqu'à la rupture du contenant. Plusieurs études ont déjà porté sur le taux d'augmentation de pression dans les contenants d'hydrogène liquide clos. A l'équilibre thermique dans le contenant, le taux d'augmentation de pression est calculé à partir de la première loi de thermodynamique. Toutefois, les contenants d'hydrogène liquide ont souvent la mauvaise habitude d'adopter des distributions thermiques en strates; il s'ensuit que les taux d'augmentation de pression observés peuvent être supérieurs (par un ordre de grandeur) aux taux calculés à partir d'un mélange thermique complet.

Certains petits contenants cryogéniques sont équipés de boucliers contre l'énergie thermique radiante qui sont refroidis par les vapeurs d'échappement; on obtient ainsi une diminution des pertes par réduction du liquide en utilisant la vapeur froide d'échappement comme réfrigérant. Avec ces contenants, tout arrêt d'échappement de vapeur entraînera une augmentation d'échange de chaleur (par un facteur de 10 ou moins) et une augmentation subséquente de pression plus rapide.

Condensation de l'air: l'hydrogène liquide est assez froid pour condenser en solide tout air (et toute humidité qu'il contient) qui pénètre dans le contenant de stockage ou dans son système d'échappement de gaz; cet air solidifié aura

à toutes fins pratiques une tension de vapeur nulle. Ce phénomène peut s'avérer dangereux pour plusieurs raisons. En premier lieu, il forme un mélange combustible. De plus, l'air ainsi condensé est très difficile à repérer et peut s'accumuler en grande quantité. En outre, une grande partie de cet air peut se condenser dans le tuyau d'échappement du contenant cryogénique, aux endroits où la température correspond au point de congélation de l'air. Une accumulation suffisante à ces endroits peut boucher le tuyau d'échappement et amorcer une augmentation de pression qui pourra entraîner la rupture catastrophique du contenant. Ce type d'accident a déjà été observé.

La condensation de l'air est dangereuse si elle survient à l'extérieur du système de stockage d'hydrogène liquide. L'hydrogène gazeux froid ou l'hydrogène liquide véhiculé par des tuyaux non isolés entraînera habituellement la condensation de l'air en liquide sur les tuyaux. Si cet air liquide dégoutte sur une surface combustible, comme l'asphalte par exemple, il peut y avoir formation d'un mélange explosif. C'est pourquoi les aires de déchargement ou de transfert d'hydrogène liquide sont habituellement recouvertes de béton et non d'asphalte. L'air liquide peut également causer des dégâts s'il dégoutte sur des installations qui ne doivent pas être refroidies, refroidies par endroits ou refroidies trop rapidement. Ce phénomène a déjà été à l'origine du fissurage de dalles de pont de barges de transport d'hydrogène liquide et même du fissurage de l'enveloppe extérieure (enveloppe sous vide en acier au carbone) d'un contenant duquel on déchargeait de l'hydrogène froid.

Efforts thermiques excessifs: il ne faut pas oublier qu'il existe souvent de forts gradients de température dans les installations de manutention d'hydrogène liquide et que ces gradients ne proviennent pas d'un refroidissement dû au gaz d'échappement; il faut donc veiller à éviter les efforts thermiques excessifs et tout refroidissement accidentel de pièces d'équipement qui pourraient être endommagées par le froid. En effet, certaines installations pourraient souffrir de fragilisation par le froid (forte perte de ductilité découlant d'une chute de température) ou d'une contraction thermique excédant la valeur de calcul permise.

La tuyauterie et les contenants de stockage des systèmes à l'hydrogène liquide sont de toute évidence des éléments pour lesquels il faut tenir compte des gradients de température à l'occasion de la conception du système et de la planification des modes d'exploitation. Les gradients de température accompagnent toujours la période de refroidissement vers la température d'exploitation et il arrive souvent que le gradient de température résiduel (qui existe après avoir atteint l'équilibre thermique) soit à l'origine d'efforts énormes.

Fragilisation par le froid: la fragilisation des métaux par le froid constitue un danger qui accompagne toute activité impliquant des fluides cryogéniques comme l'hydrogène liquide et l'hydrogène gazeux froid. En règle générale, la manutention de l'hydrogène gazeux n'est pas vraiment à l'origine de problèmes reliés aux basses températures. Toutefois, le fait d'évacuer très rapidement l'hydrogène gazeux stocké à haute pression (disons 100 atm.) entraînera une chute de température continue du gaz évacué. Pourtant, la détente Joule-Thomson à la soupape d'évacuation survient à une température supérieure à la température d'inversion et le gaz se réchauffe de quelques degrés au cours de cette détente. Mais il ne faut pas oublier que le gaz du contenant est soumis à une détente adiabatique (l'épaisse paroi du contenant empêche une admission de chaleur assez rapide pour garder la température constante). La détente adiabatique peut entraîner un refroidissement du gaz du contenant de plusieurs dizaines de degrés, ce qui fait que la température du gaz évacué ne cesse de chuter. Il peut y avoir, dans de telles conditions, danger de fragilisation par le froid de contenants qui n'ont pas été conçus pour les basses températures. Pour contrer ce danger, on a déjà utilisé des garnitures en acier inoxydable à l'intérieur du tuyau d'évacuation, aux endroits où les parois du contenant peuvent souffrir du froid par suite d'un apport de chaleur rapide au gaz évacué (2).

Blessures par le froid: à défaut de mesures préventives, l'hydrogène liquide peut causer des blessures. Tout contact avec l'hydrogène liquide ou les conduites d'hydrogène liquide non isolées peut entraîner des engelures et la destruction des tissus. Au contact de la peau, l'hydrogène liquide bout violemment, se vaporise rapidement et se répand en flottant sur une mince couche de vapeur. Par conséquent, il ne faut pas craindre les engelures sérieuses si le contact ne dure que quelques secondes.

En résumé, les basses températures des systèmes cryogéniques à l'hydrogène (habituellement aussi basses que 20 K, c'est à dire -425 ^{0}F) peuvent endommager les installations et pièces de charpente voisines. Il faut tenir compte des dangers associés aux changements de propriétés physiques. En plus d'avoir à tenir compte de la contraction thermique, il y a la fragilisation par le froid. Tout contact avec les conduites givrées, le condensat qui peut dégoutter des conduites froides ou des tuyaux d'échappement, les ailettes du vaporisateur et les fuites de vapeur peut entraîner des engelures et doit être évité. L'isolation thermique, la qualité des installations, la détection des fuites et les mesures préventives secondaires sont tous des éléments importants en matière de sécurité des installations de l'industrie de l'hydrogène cryogénique.

TABLEAU 2.3 PROPRIÉTÉS CRYOGÉNIQUES RELIÉES À LA SÉCURITÉ

Résistivité électrique de l'hydrogène liquide	env. $4{,}6 \times 10^{19}$
Rapport de volumes (gaz à 1 atm. et 300 K à hydr. liqu.)	860
Pression nécessaire à la masse spécifique de l'hydrogène liquide dans un gaz à 300 K (atm.)	env. 2000
Point d'ébullition normal de l'hydrogène liquide (K)	20,3
Chaleur latente volumique de vaporisation (J/L)	31 700

3. MESURES PRÉVENTIVES

Les dangers sus-mentionnés et les moyens qui permettent de les éviter doivent faire l'objet d'une attention particulière au cours des diverses phases de toute activité reliée à l'hydrogène, y compris la conception, la construction, la vérification, l'exploitation, l'entretien et la modification de systèmes. Tel que mentionné, la connaissance et la compréhension détaillées des propriétés dangereuses de l'hydrogène et des relations entre ces propriétés et les dangers et milieux dangereux possibles sont des prérequis nécessaires à la conception et à l'exploitation de systèmes à hydrogène sécuritaires. Le système et l'équipement doivent être conçus et construits de façon à ce qu'on puisse les exploiter en toute sécurité. Les diverses opérations d'exploitation doivent être conformes à des méthodes établies, comprenant des méthodes d'exploitation en mode normal et des méthodes utilisées en cas d'imprévu. Ces méthodes devraient être écrites et les documents revus sur une base régulière. Il faut toujours viser à éviter les dangers et les systèmes ne devraient être exploités que de la façon prévue, ce qui signifie par exemple de demeurer entre les limites de pression, de débit et de température anticipées. La formation du personnel d'exploitation devrait se faire sur une base continuelle. Un programme de sécurité permanent devrait comporter des expériences visant à fournir plus de connaissances sur l'exploitation sécuritaire du système et à illustrer ces principes à d'autres personnes.

Les communautés scientifique et industrielle et les organismes gouvernementaux ont mis au point certaines règles générales et certains codes d'exécution visant à éviter ou à atténuer les dangers; ces règles et codes sont basés sur la connaissance des propriétés dangereuses propres à l'hydrogène ainsi que sur l'expérience et les modes d'exécution industriels concernant la production, le stockage et la manutention de l'hydrogène liquide et gazeux. On a mis au point et utilisé avec succès diverses techniques analytiques industrielles visant à identifier, analyser et évaluer les dangers possibles et établir des mesures préventives pertinentes. Dans cette section, il sera question des règles de sécurité reconnues pour l'hydrogène et des techniques analytiques actuelles d'identification et d'évaluation des dangers.

Les regles générales d'exploitation et mesures préventives industrielles qui s'appliquent aux systemes à hydrogène sont les suivantes:

o Observation des codes, normes et règles

o Limitation des quantités stockées à l'intérieur

o Emplacement et séparation de l'équipement de stockage et de procédés

o Contrôle de l'accumulation d'hydrogène dans les enceintes

o Suppression de l'air

o Elimination des sources d'inflammation

o Detection et contrôle des fuites

o Endigage des déversements d'hydrogene liquide

o Instrumentation

o Detendeurs de surete

o Events et evacuateurs sûrs

o Choix de materiaux de construction convenables

o Précautions aux basses températures

o Repérage, contrôle et extinction d'incendies

o Identification et évaluation des dangers

3.1 OBSERVATION DES CODES, NORMES ET RÈGLES

Pour assurer la sécurité du personnel, il faut se conformer rigoureusement aux normes et règles reconnues dans l'industrie et observer les codes en vigueur. Par codes, on entend la réglementation (réglementaire) et les normes

(réglementaires ou non). Les codes de réglementation sont réglementaires et exécutoires mais les codes normatifs ne sont pas réglementaires, sauf s'ils sont identifiés dans les codes de réglementation des organismes responsables. Divers comités interdisciplinaires, sur lesquels siégeaient des représentants de l'industrie, du gouvernement et du milieu universitaire, ont publié des règles d'exécution sécuritaire pour chacune des phases de production et d'utilisation de l'hydrogène. Certaines de ces règles ont été adoptées à la grandeur de l'industrie comme normes nationales et ces normes deviennent réglementaires et exécutoires lorsqu'elles sont adoptées par les corps de réglementation, gouvernements locaux, municipalités, etc. Les compagnies d'assurance ont pris l'habitude d'adopter ou d'identifier des normes, règles ou méthodes existantes comme conditions, avant de déclarer assurables les organismes industriels. Comme exemples de normes non reglementaires qui pourraient être adoptées par les corps de réglementation, il y a les normes de l'ASME, l'ANSI, l'ISA, la NFPA, l'UL, etc.

Les codes et règlements actuels spécifiques aux activités reliées à l'hydrogène portent surtout sur son transport. D'autres phases de ces activités sont couvertes par des règlements plus généraux, dont une liste récente et exhaustive a été publiée par Hord (1,8). Les codes, normes et règles pour la production, le stockage et la manutention de l'hydrogène sont résumés à la section 4.

3.2 LIMITATION DES QUANTITÉS

La limitation des quantités d'hydrogène stockées et manutentionnées à l'intérieur des bâtiments est essentielle à la réduction des quantités répandues par les fuites et des accumulations menant à la formation de mélanges hydrogène-air dangereux. L'ampleur des dommages physiques et matériels causés par les incendies et les explosions peut également être atténuée en limitant les quantités d'hydrogène gazeux et liquide stockées et manutentionnées à l'intérieur. Les codes nationaux, provinciaux et municipaux du bâtiment et des incendies indiquent habituellement la quantité maximale de liquides et de gaz inflammables pouvant être stockée à l'intérieur. Les deux normes de la National Fire Protection Association (NFPA), c'est-à-dire la norme NFPA 50A sur les Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites et la norme NFPA 50B sur les Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites, indiquent la quantité maximale d'hydrogène pouvant être stockée et manutentionnée sur une petite échelle aux endroits de consommation.

3.3 EMPLACEMENT ET SÉPARATION DE L'ÉQUIPEMENT

Pour établir la distance sûre nécessaire au stockage de l'hydrogène sur une grande échelle, entre les réservoirs de stockage d'hydrogène et les habitations ou entre les divers réservoirs, il faut tenir compte de la nature des dangers pouvant affecter les espaces avoisinants en raison de la présence des réservoirs ainsi que des dangers pouvant affecter, des espaces avoisinants, les réservoirs. Les installations de manutention d'hydrogène devraient être à l'abri de dangers secondaires, comme ceux qu'offrent d'autres substances combustibles. Les éléments d'installations associés aux énormes quantités d'hydrogène, comme les réservoirs de stockage et les reservoirs d'hydrogène liquide des installations de liquéfaction, devraient être situés à une grande distance des régions de circulation dense. Il faut laisser beaucoup d'espace autour de chaque élement et prévoir des routes de sortie qui seront utilisées en cas d'incendie ou d'urgence. L'ampleur des dangers reliés aux fuites ou aux déversements accidentels dépend non seulement de la distance aux réservoirs de stockage, habitations, concentrations de population, etc, mais bien de l'importance de la fuite ou du déversement et de la probabilité d'inflammation de l'hydrogène libéré. Il est bien évident qu'une grande quantité d'hydrogène libérée entraînera un danger plus sérieux si l'hydrogène s'enflamme, d'où la nécessité d'avoir de plus grands espaces libres. En raison de la très faible énergie d'inflammation de l'hydrogène et du grand écart entre ses limites d'inflammabilité dans l'air, nous sommes en droit de supposer que, sauf rare exception, tout déversement accidentel ou toute fuite d'hydrogène s'enflammera. Par contre, le mélange hydrogène-air qui s'enflamme à l'air libre produira une déflagration, non une détonation. Ceci signifie que les dommages causés par l'explosion seront minimes. L'hydrogène produit une flamme invisible dont la température est de l'ordre de 2 317 K (3 710 ^{0}F). En dépit de cette température élevée, la flamme est peu émissive et les effets de la radiation sur l'équipement voisin ne seront pas très sérieux; il ne faut donc pas avoir de distances aussi grandes que prévues. En outre, en raison de sa grande volatilité, l'hydrogène liquide déversé s'évaporera rapidement, ce qui aura pour effet de limiter la durée de l'incendie (celui-ci durera moins longtemps que celui d'un déversement équivalent d'hydrocarbure liquide).

Exigences quantité-distance: les normes suivantes de la National Fire Protection Association contiennent des prescriptions quant à l'emplacement et à la séparation de l'équipement de procédés et de stockage contenant de l'hydrogène:

- NFPA 50A pour les Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites;

- NFPA 50B pour les Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites.

Ces deux normes visent l'utilisation à faible échelle aux endroits de consommation et les deux excluent spécifiquement les installations de production ou autres établissements exploitées par le fournisseur pour le stockage et le remplissage de l'hydrogène.

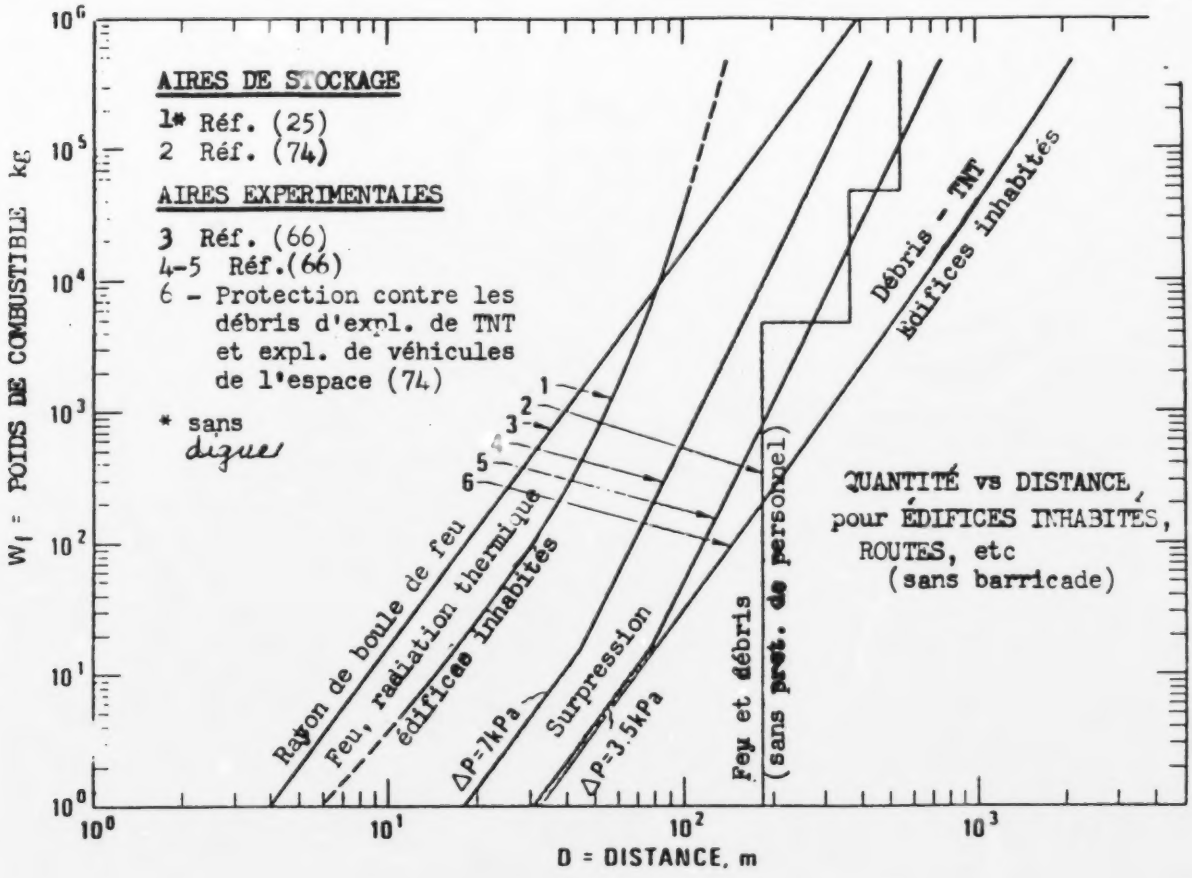
Plusieurs organismes gouvernementaux indépendants ont publié des règles concernant la distance de séparation relative au stockage de l'hydrogène liquide. Ces distances, fonctions de la quantité totale stockée, sont données en tant que distance entre le site de stockage non barricadé et les concentrations de population (par exemple, édifices non habités - figure 3.3-1) ou distance entre contenants cryogéniques voisins (figure 3.3-2). La bande de surpression de la figure 3.3-1 correspond au bris du verre de fenêtre habituel (3,5 à 7 kPa) tandis que la bande de surpression de la figure 3.3-2 a trait à la résistance théorique à la pression externe des contenants cryogéniques pour l'hydrogène liquide. Le mode de calcul et d'utilisation des données de ces figures (distances sûres sans barricade) est expliqué en détail dans un document sommaire (9) qui traite des dangers d'explosion de l'hydrogène. Les distances sans barricade nécessaires à la protection du personnel dans des édifices non habités exposés aux débris projetés provenant d'explosions de TNT sont représentés par la courbe 6 de la figure 3.3-1.

La figure 3.3-3 permet de comparer les normes industrielles reconnues de stockage de combustible pour l'hydrogène liquide, le gaz naturel liquide et l'essence. En comparant les courbes 1 et 4 de la figure 3.3-3 et les données des figures 3.3-1 et 3.3-2, on se rend compte que les normes industrielles

quantité-distance pour l'hydrogène sont moins strictes que celles qui sont avancées pour le domaine expérimental. L'expérience indique que le nombre d'accidents avec des réservoirs expérimentaux est de beaucoup supérieur au nombre d'accidents avec des réservoirs utilisés exclusivement pour le stockage. La comparaison des courbes 1 et 2, et 3 et 4 de la figure 3.3-3 indique également que les normes industrielles de stockage sont plus restrictives pour l'hydrogène liquide que pour le gaz naturel liquide. Les exigences quantité-distance pour l'hydrogène liquide (proposées par le Bureau of Mines) et le gaz naturel liquide (proposées dans la norme Z276-M1981 de l'ACNOR) sont comparées aux tableaux 3.3-1 et 3.3-2. Les distances suggérées pour l'hydrogène liquide sont basées sur une humidité de 1% dans l'atmosphère et excluent les substances sensibles aux chocs; elles correspondent bien aux valeurs de la courbe A des figures 3.3-1 et 3.3-2.

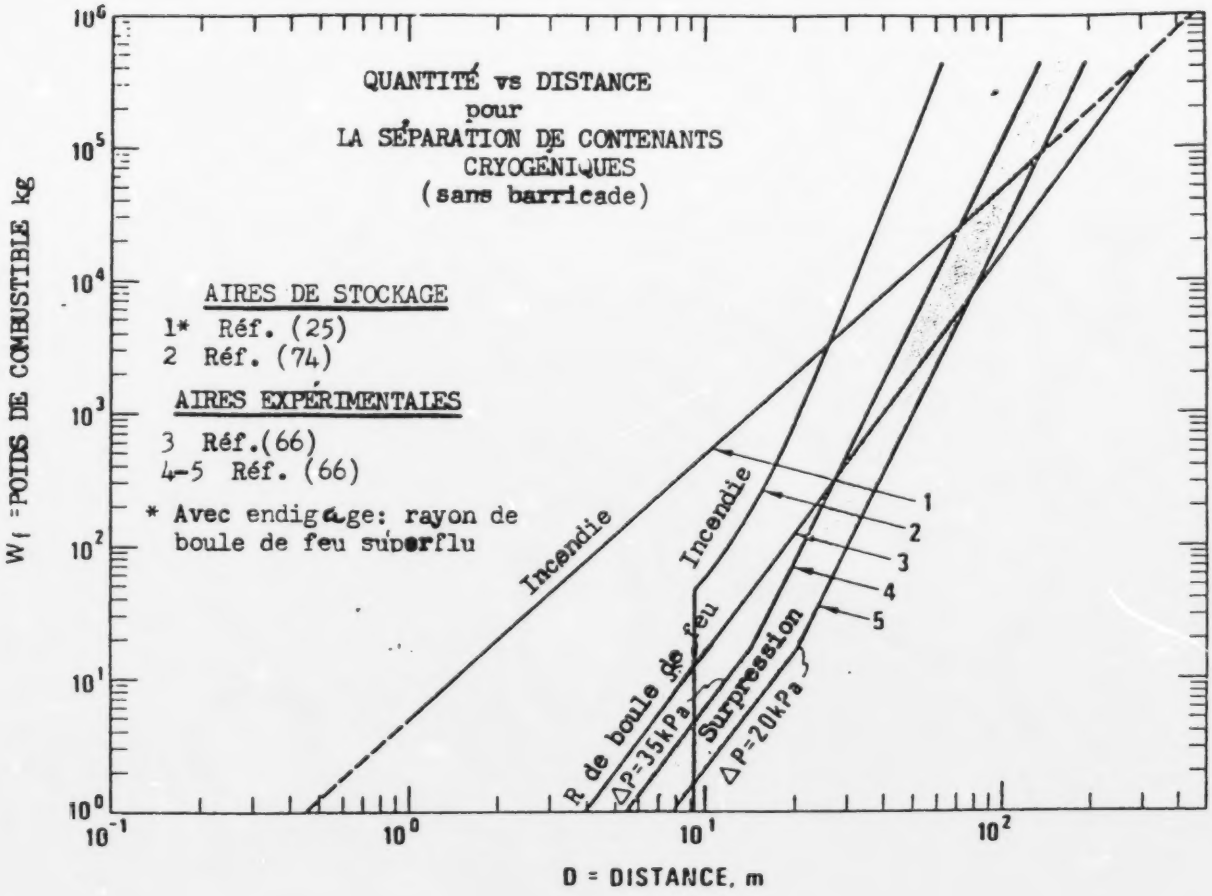
Une série unique de documents (10) offre une étude détaillée de la surpression, des impulsions, des boules de feu, des débris projetes, des barricades, des réponses des charpentes et des effets physiologiques, en ce qui a trait aux explosions de combustibles de propulsion. On croit que ces documents s'appliquent aux explosions combustible-air si l'équivalence en TNT est bien évaluée. La NASA (11,12) a procédé à une compilation, à une analyse et à une corrélation détaillées des données de fragmentation disponibles concernant les explosions de réservoirs de combustibles de propulsion liquides et de stockage de gaz. L'article d'étude de la question de Strehlow et Baker (35) résume les règles de l'art en ce qui a trait à la caractérisation et à l'évaluation des explosions accidentelles.

En résumé, les facteurs qui affectent la relation quantité-distance de sécurité pour le stockage de l'hydrogène sont la quantité stockée, la grosseur de boule de feu possible, la radiation de la flamme, les dommages dus aux débris projetés et la surpression. La relation intensité-distance pour la radiation de la flamme d'hydrogène est étroitement reliée à la quantité de vapeur d'eau dans l'air. En outre, l'incertitude concernant la quantité d'énergie émise que l'on peut anticiper rend difficile l'évaluation des dommages causés par les débris projetés et la surpression. Certaines autorités ont avancé des relations quantité-distance pour le stockage sûr de l'hydrogène. Les différences de valeurs de distance de séparation recommandées illustrent bien les différents degrés de conservatisme des diverses autorités responsables des critères de sécurité et les différences d'opinion concernant l'ampleur d'un accident possible. De toute évidence, dans le doute, il faut utiliser les critères les plus conservateurs.



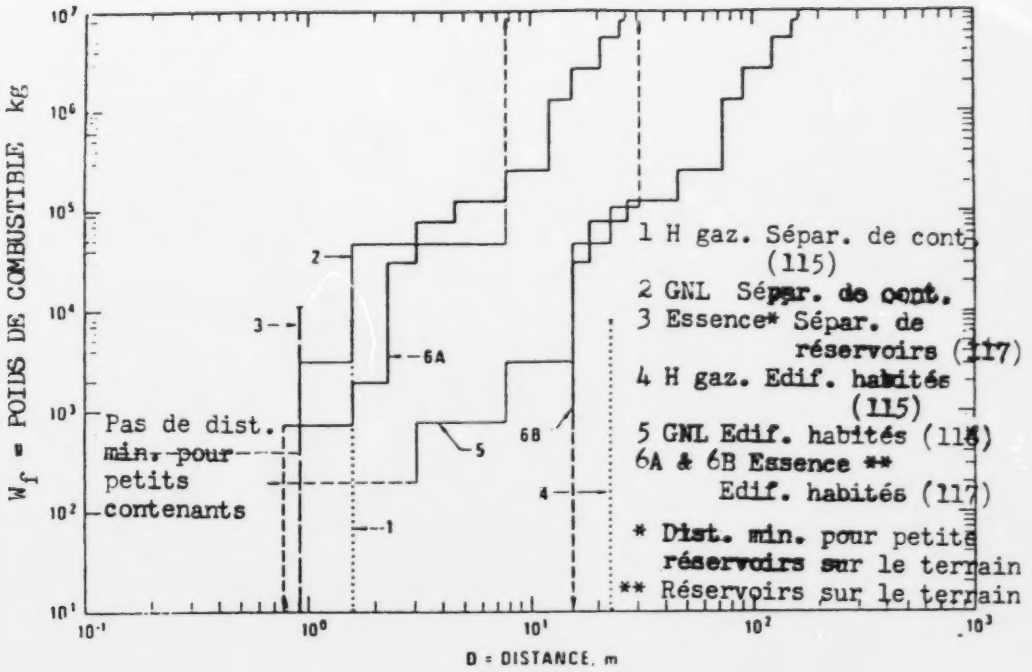
Relations quantité-distance pour la protection du personnel à proximité d'aires de stockage d'hydrogène liquide et d'aires expérimentales (non barricadées)

Figure 3.3-1



Relations quantité-distance pour la séparation des contenants contenants cryogéniques d'hydrogène liquide dans les aires de stockage et les aires expérimentales (non barricadées)

Figure 3.3-2



Normes industrielles de stockage (quantité-distance) pour l'hydrogène, le gaz naturel liquide (GNL) et l'essence

Figure 3.3-3

TABLEAU 3.3-1 DISTANCE ENTRE RÉSERVOIRS VOISINS

QUANTITÉ DE LIQUIDE (kg)	DISTANCE (m)	
	Hydr. liqu.	Gaz nat. liqu.
Inférieure à 210	15	Aucune
211 - 420	15	Aucune
421 - 900	15	0,9
901 - 3210	30,5	0,9
3211 - 4537	30,5	1,5
4538 - 9075	45,7	1,5
9076 - 18150	60,96	1,5
18151 - 27225	76,2	1,5
27226 - 45372	91,4	1,5
45373 - 48170	-	1,5
48171 - 111990	-	3
Supérieure à 111990	-	*

* 1/4 de la somme des diamètres de deux réservoirs voisins, sans être inférieure à 7,5 m.

TABLEAU 3.3-2 DISTANCE RÉSERVOIR-ÉDIFICE HABITÉ

QUANTITÉ DE LIQUIDE (kg)	DISTANCE (m)	
	Hydr. liqu.	Gaz nat. liqu
Inférieure à 90	30,5	aucune
91 - 210	45,7	aucune
211 - 420	45,7	3
421 - 800	61,0	3
801 - 2269	61,0	7,5
2270 - 3210	76,2	7,5
3211 - 9074	76,2	15
9075 - 18149	91,4	15
18150 - 45372	106,7	15
45373 - 48170	-	15
48171 - 111990	-	22,5
Supérieure à 111990	-	*

* 0,7 fois le diamètre du réservoir, sans être inférieure à 30,5 m.

3.4 CONTRÔLE DE L'ACCUMULATION D'HYDROGÈNE DANS LES ENCEINTES

La démarche est évidemment de contenir tout l'hydrogène dans le système d'utilisation. Dans l'éventualité de petites fuites à l'intérieur, les évents de toiture et, dans la mesure du possible, une ventilation forcée assez puissante permettent d'éviter que des mélanges explosifs soient produits. Toutefois, lorsqu'il y a de très grandes quantités d'hydrogène en jeu et que les probabilités de grosses fuites existent, il peut s'avérer impossible d'avoir une ventilation suffisante. Dans une telle situation, la réduction de l'atmosphère de la pièce avec une quantité suffisante de gaz inerte, comme l'azote, est à conseiller. Il faut surveiller la concentration d'oxygène et la réduire, au besoin, à moins de 4% en ajoutant plus de gaz inerte. Avant de permettre à quiconque de pénétrer dans la pièce, il faut s'assurer d'avoir éliminé le gaz inerte ou exiger de porter des appareils respiratoires autonomes. Pour amorcer le procédé dans une pièce bien étanche, il faut utiliser un volume d'azote gazeux qui correspond à 1,7 fois le volume de la pièce.

3.5 SUPPRESSION DE L'AIR

Tout système à hydrogène gazeux ou liquide doit être exempt d'air. On s'assure d'avoir un système propre pour l'hydrogène gazeux ou liquide en procédant à une purge et une évacuation ou un nettoyage à l'aide d'un gaz inerte, et en surveillant bien le système. Pour éviter les mélanges hydrogène-air indésirables, il faut pouvoir éliminer l'air de l'équipement avant d'y admettre l'hydrogène. A la suite de cette opération, il est préférable, dans la plupart des cas, d'évacuer l'hydrogène résiduel du système. Pour les systèmes à hydrogène gazeux, on utilise habituellement l'hélium ou l'azote comme gaz de nettoyage; les systèmes à hydrogène liquide sont nettoyés à l'hélium. Pour l'équipement offrant un faible rapport de longueur à diamètre, comme les contenants cryogéniques sphériques, il est à conseiller d'évacuer le contenant de façon à avoir une pression résiduelle de quelques torrs seulement et de le remplir ensuite d'hydrogène ou de gaz inerte comme l'azote ou l'hélium. Si on le remplit d'hydrogène directement, l'évacuation devrait avoir permis d'obtenir une pression assez basse pour empêcher la formation d'un mélange explosif au cours du procédé de nettoyage. Il est également possible de pressuriser le contenant à l'aide d'un gaz inerte et

d'évacuer le mélange résultant, et recommencer l'opération jusqu'à ce que le contenant soit assez propre. Il faudra peut-être répéter chacune de ces opérations à plusieurs reprises avant d'avoir la propreté désirée. Pour le nettoyage à vide, le système doit avoir été conçu pour satisfaire aux conditions du vide.

Pour l'équipement offrant un grand rapport de longueur à diamètre, il est souvent préférable de procéder à un nettoyage par circulation. Ceci s'appliquerait par exemple à une conduite ou tuyau de transfert. Il faut prendre soin de ne pas avoir d'impasses dans la tuyauterie; s'il s'avère impossible de les éviter, il faut faire en sorte qu'une partie du gaz d'épuration puisse sortir par une bouche supplémentaire à l'extrémité de la ramification latérale.

Quelle que soit l'opération de nettoyage, il ne faut pas se fier au calcul du degré de propreté obtenu. Il faut plutôt prélever des échantillons à différents endroits du système et les analyser pour y déceler les quantités résiduelles d'air.

Sauf exception due à des circonstances inhabituelles, il faut stocker l'hydrogène liquide à une pression supérieure à celle du milieu ambiant afin d'éviter la pénétration d'air dans le contenant cryogénique dans l'éventualité de fuites. Pour les contenants cryogéniques à faible réduction d'hydrogène liquide, le système d'échappement doit comporter un dispositif qui empêche la pénétration d'air. En outre, la vitesse du gaz dans le système d'échappement doit être assez élevée pour que l'air ne puisse vraiment pas pénétrer dans le contenant par suite d'une rétro-diffusion lente à travers la couche limite d'hydrogène stagnant située à proximité de la paroi du tuyau d'échappement.

3.6 ÉLIMINATION DES SOURCES D'INFLAMMATION

Avec les systèmes à hydrogène, il faut absolument contrôler la présence de sources d'inflammation. Il faut par exemple défendre aux gens de fumer, défendre les flammes libres, etc, dans un certain rayon du système, et éliminer toute autre source d'inflammation possible comme les étincelles produites par l'équipement électrique, les gaz et surfaces chauds et l'électricité statique. En raison du faible minimum d'énergie d'inflammation

(0,02 mJ) de l'hydrogène, une légère étincelle, comme celle produite par une décharge électrostatique, suffit pour enflammer un mélange hydrogène-air stoechiométrique. Comme sources courantes d'électricité statique, il y a les mouvements de contact et de rupture de contact entre substances différentes, le mouvement de particules d'impuretés solides dans la tuyauterie et les contacts avec le corps humain (ce genre de décharge électrostatique peut produire des étincelles de 10 mJ). L'hydrogène liquide a une très forte résistivité électrique, ce qui empêche, à toutes fins pratiques, que des charges s'y accumulent lorqu'il est en mouvement; par contre, il est possible que des charges s'accumulent et persistent dans les écoulements d'hydrogène présent sous ses deux phases. Quel que soit le système de débit de fluides combustibles, on ne peut se permettre de croire en l'absence de charges statiques et il faut vraiment s'assurer de leur absence. Par conséquent, les pièces d'équipement de procédés, les réservoirs de stockage et les autres éléments des systèmes doivent être raccordés à un système de mise à la terre convenable. Les joints avec garniture des pipe-lines doivent être montés en dérivation avec une courroie conductrice d'électricité. Les pièces d'equipement qui ne sont pas habituellement mises à la terre et qui doivent être raccordées au système à hydrogène doivent être, avant tout, bien raccordées électriquement. Avant de pouvoir faire et rompre des raccords de conduites d'hydrogène, le personnel doit être mis au sol (à l'aide de souliers à semelles conductrices par exemple). Les systèmes de mise à la terre doivent faire l'objet d'inspections et d'entretiens périodiques pour s'assurer de leur qualite. On ne pourra jamais trop insister sur l'importance d'une bonne mise à la terre. Celui qui se satisfait d'une mise à la terre plus ou moins convenable s'expose au danger d'une inflammation causée par une décharge statique, suivie d'un incendie sérieux.

L'élimination des sources d'inflammation associées à d'autres équipements est beaucoup plus difficile à contrôler. Certains systèmes à hydrogène exigent divers équipements électriques et électroniques pour lesquels il s'avère très difficile d'éliminer la totalité des sources d'inflammation. Dans le cadre de certaines applications, l'équipement électrique devra être conforme aux codes de sécurité pertinents et il faudra peut-être se servir d'équipement antidéflagrant aux endroits offrant des dangers particuliers. L'équipement antidéflagrant doit pouvoir limiter toute inflammation à l'intérieur du boîtier. Toutefois, en raison de la faible distance d'extinction

de la flamme de l'hydrogène, il n'est pas facile de construire ce type d'équipement. Par conséquent, si l'équipement qui peut agir comme source d'inflammation doit être placé à un endroit où il peut y avoir des mélanges combustibles d'hydrogène et d'air, on peut l'installer dans une enceinte qui est nettoyée à l'azote gazeux, tel que sus-mentionné pour le nettoyage de la pièce.

Il est impossible d'avoir un contrôle parfait de l'inflammation dans les situations où il faut sans cesse évacuer l'hydrogène dans l'atmosphère (une telle situation serait le stockage de l'hydrogène liquide) car l'inflammation peut découler de causes naturelles, comme la foudre par exemple. Il n'est pas nécessaire que la foudre frappe directement car l'effet de couronne accompagnant l'éclair qui frappe à quelques centaines de pieds peut entraîner l'inflammation du gaz évacué. Les systèmes de stockage d'hydrogène liquide devraient être pourvus de systèmes d'évacuation qui supportent un tel incendie sans dégâts.

3.7 DÉTECTION ET CONTRÔLE DES FUITES

Tous les systèmes à hydrogène devraient être pourvus de détecteurs convenables permettant de surveiller la concentration d'hydrogène. En pratique, une concentration qui correspond à 20% de la limite inférieure d'inflammabilité (LII) est jugée dangereuse. Si la concentration de gaz mesurée atteint 50% de la LII, il faut couper l'alimentation en gaz et fermer le système en observant les règles de sécurité (36).

L'étude des nombreux écrits de la NASA et de la U.S. Air Force en matière de sécurité et de manutention de l'hydrogène indique qu'il faut être extrêmement prudent et conservateur avec l'hydrogène et qu'il faut définitivement procéder à la détection des fuites (6, 13, 14, 15). En dépit des mauvaises caractéristiques de l'hydrogène en ce qui a trait aux fuites, on a bel et bien réussi à démontrer dans l'industrie qu'il est facile de contenir l'hydrogène liquide et gazeux en toute sécurité.

Détection des fuites: il existe déjà un vaste choix de détecteurs de fuites sur le marché et la mise au point de nouveaux détecteurs se poursuit. Les techniques de détection des fuites d'hydrogène sont résumées dans deux documents (13, 14), tandis que les méthodes générales sont décrites en détail

dans un manuel rédigé par Marr (14). Les détecteurs de fuites d'hydrogène stationnaires et portatifs les plus courants sont de type à combustion catalytique. Il existe également des détecteurs ultrasoniques portatifs, mais ceux-ci sont sensibles au bruit de fond. Un résumé des méthodes de détection de fuites d'hydrogène et de repérage d'incendies dus à l'hydrogène, basé sur un relevé des installations industrielles et autres utilisateurs d'hydrogène, est présenté sous forme de tableau à l'annexe B (6, 13).

Contrôle des fuites: la quantité d'hydrogène qui s'échappe par suite d'une fuite devrait être limitée en stoppant l'écoulement de gaz (arrêter les pompes, compresseurs, fermer les soupapes, etc) et en isolant l'équipement et les conduites à l'aide des soupapes d'arrêt. Pour les systèmes à hydrogène gazeux, le système à bague et bride feinte offre une bonne isolation. Comme autre solution, il y a le système à "double arrêt et vidange"; deux soupapes sont installées en série et le volume entre elles est vidangé à l'atmosphère.

Pour isoler la conduite d'écoulement d'un réservoir cryogénique de stockage d'hydrogène liquide, les deux méthodes sus-mentionnées ne font pas l'affaire. On peut par contre utiliser un "bouchon à l'hélium". Pour ce faire, on utilise deux soupapes d'arrêt en série. A la suite d'un prélèvement d'hydrogène liquide, on nettoie la conduite avec de l'hélium gazeux à une pression légèrement supérieure à la pression du contenant cryogénique de stockage. Avec la méthode "double arrêt et vidange", toute petite fuite du réservoir a pour effet de détruire tout bouchon (piège) gazeux incorporé au système pour réduire les fuites de chaleur de la soupape d'arrêt au réservoir. En outre, le refroidissement de la soupape a pour effet d'accentuer graduellement la fuite. Avec le bouchon à l'hélium, seul l'hélium peut fuir en petite quantité dans le réservoir. On doit s'assurer de la sûreté du système à hydrogène en supposant que chaque soupape de système peut être à l'origine de fuites à tout moment.

7.8 ENDIGAGE DES DÉVERSEMENTS D'HYDROGÈNE LIQUIDE

Comme autre précaution nécessaire pour le stockage de l'hydrogène liquide, il y a l'endigage des déversements accidentels d'hydrogène liquide. Les installations de stockage de gaz naturel liquide doivent habituellement, de par la loi, comporter des ouvrages de retenue de liquide déversé visant à protéger les réservoirs de stockage voisins, les bâtiments, les routes, etc,

des dangers d'incendie et de radiation. Toutefois, pour l'hydrogène liquide, ce type d'endigage pourrait entraîner le passage de la combustion, par suite d'une grosse défaillance de réservoir, à une détonation plus destructive plutôt qu'une simple déflagration. Les réservoirs cryogéniques d'hydrogène liquide peuvent être entourés de petites digues qui peuvent tout juste contenir le contenu du réservoir si jamais il y a défaillance majeure de celui-ci. Si le réservoir est assez bien isolé, il est préférable de profiler le terrain de façon à ce que toute grande quantité d'hydrogène déversé puisse couler vers un endroit où l'incendie peut faire moins de dégâts. Un des principaux résultats des récentes expériences de déversement rapide d'hydrogène liquide, comme celui qui peut découler de la rupture d'une installation de stockage, est que l'utilisation de digues entourant les installations semble accroître la durée de vie du nuage inflammable au niveau du sol et qu'il serait préférable de ne pas utiliser de digues mais bien de tirer profit des mécanismes de dispersion découlant de la turbulence induite par le déversement et la vaporisation.

3.9 INSTRUMENTATION

Tel que mentionné, l'hydrogène est incolore, sans saveur et inodore, et sa flamme est presque invisible. En outre, l'hydrogène liquide est très volatile et pour empêcher que la chaleur ne pénètre dans le système, on s'efforce d'éliminer toute radiation pouvant l'atteindre, même la radiation du visible. C'est pourquoi il s'avère habituellement impossible de voir l'hydrogène liquide dans un système bien conçu et bien exploité. Cette caractéristique de l'hydrogène fait que l'utilisateur dépend exclusivement d'instruments pour exploiter le système en toute sécurité et de façon fiable et efficace.

Il s'ensuit que tout système de manutention d'hydrogène doit comporter une bonne instrumentation, constituée entre autres d'appareils de mesure de température, de pression, de débit, de niveau de liquide (pour l'hydrogène liquide), et de détection d'hydrogène. Toutes ces mesures peuvent avoir un effet direct sur l'exploitation sûre du système et il faut penser à incorporer les divers appareils au système au stade de sa conception initiale. Vraiment, les instruments ne doivent pas être ajoutés au système mais bien en faire partie au départ. Ceci permet de concevoir les orifices d'échantillonnage nécessaires, ainsi que l'équipement de surveillance d'hydrogène et les analyseurs de gaz. Plus souvent qu'autrement, il est plus onéreux et parfois impossible d'ajouter les points de mesure de température désirés ou les orifices d'échantillonnage à un système fini.

L'équipement de détection d'hydrogène est de toute évidence important, et pour obtenir les meilleurs résultats de ce type de système, il est nécessaire que l'utilisateur connaisse bien le principe de fonctionnement (conductivité thermique ou oxydation catalytique) et les particularités des différents détecteurs. Comme particularités, il y a le temps de réponse du système et les sources possibles de fausses alertes. En outre, il est préférable de ne pas dépendre d'un seul détecteur.

3.10 DÉTENDEURS DE SÛRETÉ

Tout système qui contient de l'hydrogène liquide ou de l'hydrogène gazeux froid doit comporter un moyen de détente de pression visant à empêcher toute augmentation de pression indue lorsque le système est ramené à la température ambiante. Les réservoirs cryogéniques de stockage d'hydrogène liquide sont habituellement pourvus d'un système d'échappement conçu pour la détente à une pression préréglée, avec une soupape de sûreté et un disque de rupture d'appoint. La soupape de sûreté doit être vérifiée de façon régulière et le disque de rupture remplacé à intervalles réguliers; ce dernier peut souffrir de durcissement (entraînant une augmentation de pression de rupture) ou de fatigue (entraînant une chute de pression de rupture). Pour pouvoir pressuriser le réservoir cryogénique à l'aide d'un gaz, il faut avoir, dans le réservoir, un diffuseur qui empêche le gaz fourni d'atteindre directement la surface du liquide.

Il n'y a pas que le réservoir cryogénique de stockage qui doive être pourvu de détendeurs. Il faut veiller à détendre la pression en trois autres endroits:

a. toute section de conduite de transfert ou autre endroit où l'hydrogène liquide ou gazeux froid peut être isolé entre deux soupapes, par inadvertance ou de façon intentionnelle;

b. tout volume interne de gaz expérimental qui dépend de l'hydrogène liquide à l'extérieur pour demeurer froid.

Dans un tel cas, la perte de réfrigération pourrait entraîner une augmentation de pression indue; et enfin,

c. l'espace d'isolation sous vide qui entoure habituellement le système cryogénique.

La surface interne froide de l'espace sous vide constitue une excellente pompe cryogénique pour l'air qui pourrait pénétrer dans le système. A la température de 20 K de l'hydrogène liquide, la tension de vapeur de N_2 est de l'ordre de 10^{-11} torr et il est impossible de détecter la présence de quantités appréciables d'air ayant pu pénétrer dans le système sur une longue période. Le fait de vidanger le système de son liquide cryogénique entraîne un réchauffement qui peut causer une augmentation rapide de pression dans l'espace sous vide, en raison du réchauffement analogue de l'air piégé.

3.11 ÉVENTS ET ÉVACUATEURS SÉCURITAIRES

Il faut avoir des évents pour évacuer de petites quantités d'hydrogène gazeux de temps à autre. Comme exemples de gaz à évacuer, il y a ceux des soupapes de sûreté, des disques de rupture, des soupapes de détente, etc. Les conduites d'évacuation reliées à ces différentes sources devraient arriver à une colonne d'évent qui est assez haute au-dessus de l'équipement et des bâtiments. Les dimensions de la colonne d'évent et de la tuyauterie d'interconnexion doivent permettre de satisfaire au maximum de débit possible à évacuer. La colonne doit être placée de façon à ce que les vents dominants n'entraînent pas l'effluent de la colonne dans une région où il pourrait être dangereux. Les colonnes d'évent usuelles ne permettent pas d'évacuer en toute sécurité les grandes quantités d'hydrogène. Pour éliminer rapidement les grandes quantités d'hydrogène (à un rythme supérieur à plusieurs centaines de grammes à la seconde), il est préférable de procéder par combustion: le liquide ou le gaz est véhiculé par des conduites sur une grande distance pour être brûlé de façon convenable. L'installation devrait comporter un dispositif de repérage d'extinction de flamme et des moyens de purge de conduite. La conduite devrait être pourvue d'une soupape de retenue pour empêcher la rétrodiffusion de l'air.

L'évacuation de routine du gaz des réservoirs cryogéniques de stockage d'hydrogène liquide est synonyme habituellement de débits plutôt faibles qui peuvent être évacués directement à l'atmosphère sans avoir à faire appel à la combustion. De façon générale, il ne s'agira que de débits de l'ordre de 1 g/s.

Pour les grandes installations de stockage d'hydrogène liquide, il faut tenter, en règle générale, d'avoir des réservoirs cryogéniques de stockage qui soient chacun indépendant du reste du système. Ceci signifie que les pertes normales par réduction de liquide devraient être évacuées par une colonne d'évent locale distincte du reste du système. Ceci permet d'éviter les interactions qui pourraient créer des problèmes dans le réservoir par suite d'un problème quelconque ailleurs dans le système. Il n'est pas toujours souhaitable d'éteindre un incendie qui survient lorsque de grandes quantités sont évacuées. Si l'évacuation peut être arrêtée, l'accumulation d'hydrogène possible peut entraîner un danger plus sérieux que l'incendie qui fait rage.

On peut également munir la colonne d'évent d'un dispositif d'alimentation en hélium. Si un incendie se déclare dans la colonne, on amorce une légère circulation d'hélium, puis on coupe l'hydrogène et on laisse circuler l'hélium jusqu'à ce que le sommet du système d'évacuation soit assez froid pour ne pas causer de ré-inflammation. Le tout prend environ 5 minutes. On peut ensuite revenir à l'évacuation de l'hydrogène puis couper la circulation d'hélium.

Une autre méthode d'élimination de grandes quantités d'hydrogène consiste à utiliser un étang de combustion. L'hydrogène bouillonne dans un étang rempli d'eau et y est brûlé à la surface.

3.12 REPÉRAGE, CONTRÔLE ET EXTINCTION D'INCENDIES

La flamme de l'hydrogène est pratiquement invisible le jour et on la voit mieux si l'air contient de l'humidité ou des impuretés. Les incendies dus à l'hydrogène sont faciles à repérer la nuit ou dans une lumière tamisée et les gros incendies peuvent être repérés le jour en notant, près du foyer, des "ondulations thermiques" de convection dans l'air, en plus de sentir un réchauffement de la peau causé par la radiation thermique. Les petits incendies d'hydrogène sont plus difficiles à repérer et exigent certaines précautions visant à protéger le personnel et l'équipement. La technologie du repérage d'incendies actuelle est résumée dans un document récent (15) et celle du repérage d'incendies d'hydrogène est passée en revue dans un document plus ancien (13).

On utilise deux types de détecteurs - thermiques et optiques - pour repérer les feux d'hydrogène. Les détecteurs thermiques sont du type classique et ont fait l'objet d'une étude détaillée par Custer et Bright (15). Ces détecteurs classiques (y compris les détecteurs de fumée et détecteurs à ionisation), combinés à la détection visuelle de la flamme, permettent de bien déceler les incendies de méthane et d'essence mais ne permettent pas vraiment de déceler tous les incendies d'hydrogène. L'aérospatiale a fait progresser énormément la technique des détecteurs optiques utilisés pour déceler les feux d'hydrogène dans les milieux à forte luminosité. Les détecteurs optiques les plus courants mesurent la radiation ultraviolet ou infrarouge en faisant appel à diverses techniques (13, 15). On a déjà utilisé avec succès des téléviseurs infrarouge et ultraviolet en circuit fermé, équipés de filtres convenables, pour déceler les feux d'hydrogène sur les bancs d'essai des moteurs de fusée (18). Les peintures intumescentes ont également servi à déceler les feux d'hydrogène. Ces peintures carbonisent et gonflent à basse température (200 ^{0}C) et émettent des gaz âcres.

De toute évidence, les feux d'hydrogène sont plus difficiles à repérer que les feux de méthane ou d'essence; toutefois, avec la grande variété d'équipement moderne de repérage, il est maintenant possible de repérer rapidement et avec assurance les flammes de ces trois combustibles.

Méthodes d'extinction d'incendies: La NFPA a publié une brève étude des méthodes d'extinction d'incendies et des modes recommandés d'extinction d'incendies pour diverses substances combustibles (19).

Le moyen de lutte contre l'incendie d'hydrogène le plus efficace consiste à le laisser brûler jusqu'à épuisement. Dans la mesure du possible, il faut couper la circulation d'hydrogène en fermant une soupape entre l'incendie et la source d'hydrogène. Vaut mieux ne pas tenter d'éteindre la flamme avec de l'eau ou tout autre produit d'extinction, car l'hydrogène s'enflammera certainement à nouveau et pourra être alors à l'origine d'une explosion si le mélange hydrogène-air y convient. Les dégâts seraient alors certainement plus sérieux que les dégâts de l'incendie.

Tout de même, il faut avoir des systèmes de protection contre l'incendie. Comme principaux moyens de protection contre l'incendie, il y a la séparation de l'équipement par une distance convenable et le système de bouches à incendie qui peut être utilisé par le personnel de lutte contre l'incendie pour refroidir l'équipement voisin et faire en sorte que l'incendie ne puisse se propager.

3.13 CHOIX DE MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION CONVENABLES

Pour choisir des matériaux qui conviennent à l'hydrogène, il faut tenir compte des principaux critères suivants:

- le matériau doit être à l'épreuve de la fragilisation par l'hydrogène lorsque soumis aux conditions normales d'utilisation;

- le matériau doit être assez ductile pour être utilisé aux températures de l'hydrogène liquide (20,4 K);

- le matériau doit pouvoir servir à la fabrication de pièces d'équipement qui offrent un maximum d'étanchéité;

- le matériau doit pouvoir résister aux températures élevées associées aux incendies.

A défaut de données pertinentes concernant les mécanismes de la fragilisation par l'hydrogène, la conception de l'équipement repose actuellement sur une gamme de formules empiriques et ne fait appel à aucune méthode reconnue. On procède au calcul et à la conception de l'équipement pour l'hydrogène en se basant sur certains facteurs, dont les suivants:

Graphiques de Nelson: ces graphiques ne sont utiles que pour établir la résistance d'un matériau donné à la fragilisation chimique par l'hydrogène et, de façon générale, ne peuvent être utilisés en fonction des autres effets de fragilisation par l'hydrogène décrits à la section 2.3. Un exemple de graphique de Nelson indiquant les conditions de calcul sûr pour l'acier au carbone usuel et l'acier au carbone allié au molybdène est illustré à la figure 2.3-1.

"Règle empirique": résistance à l'écoulement de 110 000 lb/po^2: les aciers à faible résistance à l'écoulement permettent d'atténuer les effets comme la fragilisation par l'hydrogène ambiant et la fissuration par tensions dues à l'hydrogène (section 2.3). De façon générale, cette règle empirique ne s'applique pas aux autres formes de fragilisation par l'hydrogène.

Alliages coûteux.

Traitements thermiques et détrempes coûteux: ici encore, les traitements thermiques et détrempes sont efficaces contre certains effets de la fragilisation mais ne peuvent vraiment servir à contrer toutes les formes de fragilisation par l'hydrogène.

Surconception: utilisation de coefficients de sécurité élevés.

Essai des matériaux de construction proposés dans des conditions spécifiques.

L'existence d'un grand nombre de procédés industriels faisant appel à l'hydrogène démontre que les techniques de conception actuelles ont fait leurs preuves lorsqu'il est question d'hydrogène, mais il existe des cas de défaillance d'équipement bien documentés pour lesquels nous ne pouvons trouver aucune raison (20).

Pour éviter la fragilisation par l'hydrogène, il est recommandé d'utiliser les critères de conception d'installations à l 'hydrogène suivants (5):

- Utiliser, dans la mesure du possible, un acier à faible résistance à l'écoulement.

- Utiliser des matériaux soumis à un traitement thermique et à une détrempe complète.

- Utiliser des techniques de soudage soignées qui permettent d'éviter les durcissements localisés et les imperfections.

- Procéder à une inspection soignée de tous les matériaux afin de déceler les imperfections, y compris les vides, inclusions et durcissements localisés.

o Concevoir l'installation en vue d'avoir un minimum d'efforts dans tous les éléments (notamment les efforts cycliques).

o Eviter à tout prix la déformation plastique des divers matériaux.

o Songer à utiliser une impureté comme l'oxygène, en faible concentration, pour contrôler la fissuration par tensions dues à l'hydrogène et la fragilisation par l'hydrogène ambiant.

Il est préférable d'utiliser des garnitures d'étanchéité à base d'amiante ou autre substance non combustible car le nylon, le teflon et le caoutchouc ont tendance à brûler ou gauchir aux températures élevées.

Les garnitures de soupape devraient être de matériau qui ne fond pas ou ne brûle pas. Voici une autre mesure préventive contre les fuites pouvant survenir au cours d'un incendie.

3 14 PRÉCAUTIONS AUX BASSES TEMPÉRATURES

Avec l'hydrogène liquide et l'hydrogène gazeux froid, il faut prendre soin de choisir des matériaux qui ne deviennent pas fragiles aux basses températures. Les matériaux choisis devraient conserver leur ductilité, même aux températures de l'hydrogène liquide. Comme matériaux approuvés, il y a les aciers inoxydables austénitiques (série 300), le cuivre, le monel, le bronze, le laiton et l'aluminium. Les aciers inoxydables sont préférables et sont les plus utilisés. L'aluminium ne se prête pas habituellement aux applications autres que les contenants d'hydrogène liquide ou parties de systèmes à hydrogène liquide pourvues d'une enveloppe sous vide ou enfermées dans un boîtier isolé thermiquement. L'objectif est de protéger le système dans l'éventualité d'un gros incendie. L'aluminium, possédant un point de fusion plutôt faible, pourrait être à l'origine de la défaillance de la tuyauterie ou d'un réservoir au cours de l'incendie et entraîner la fuite de fortes quantités d'hydrogène.

L'hydrogène liquide peut être la cause de surfaces froides non désirées et inattendues. Tel que mentionné à la sous-section 2.3.7, la condensation d'air riche en oxygène par des surfaces froides peut constituer un danger. Il faut

prendre soin d'éviter le refroidissement des équipements auxiliaires, que ce soit par contact direct avec des surfaces froides ou par l'entremise de l'air condensé, de façon à ce que les fluides d'exploitation ne gèlent ou que les éléments de charpente ne deviennent fragiles ou soumis à de trop grands efforts par suite de contractions thermiques. En outre, ces surfaces métalliques froides peuvent constituer, pour le personnel, un danger de brûlure plus sérieux que le liquide cryogénique. Il s'ensuit qu'il faut isoler thermiquement les éléments du système, comme les conduites d'échappement, qui peuvent devenir froids dans des situations normales ou inhabituelles. Pour une telle isolation, il n'est pas nécessaire de faire appel au vide; il suffit tout simplement d'utiliser un revêtement extérieur de mousse isolante non combustible, l'enrichissement en oxygène des pores de la mousse ne formant pas un mélange explosif avec un matériau qui est habituellement non combustible ou sujet à une combustion lente.

L'équipement cryogénique est souvent accompagné de forts gradients de température qui peuvent soumettre les procédés d'exploitation à des efforts thermiques. En outre, les systèmes cryogéniques doivent être refroidis aux températures d'exploitation et ce refroidissement est accompagné du mécanisme pouvant mener à d'intenses efforts transitoires de refroidissement. Par conséquent, la conception sécuritaire de toute installation cryogénique exige une analyse et une évaluation soignées des efforts thermiques possibles. A titre d'exemple, les longues tuyauteries exigent une bonne flexibilité obtenue à l'aide de coudes en U et de raccords coudés ou de raccords flexibles.

De plus, au cours du refroidissement des systèmes cryogéniques par un liquide cryogénique comme l'hydrogène liquide, il faut s'attendre à des écoulements impliquant deux phases. Pour les écoulements faibles, comme ceux qu'exige le refroidissement des tuyaux à paroi épaisse, les deux phases peuvent se distribuer en couches, avec le liquide s'écoulant au fond du tuyau et le gaz au sommet. La chaleur de vaporisation disponible (en plus d'une transmission de chaleur accrue vers le liquide) permet d'avoir un mécanisme qui fait que la partie inférieure du tuyau se refroidit plus rapidement que sa partie supérieure, d'où l'apparition d'efforts thermiques. Pour éviter ces efforts, il faut limiter l'écoulement de liquide cryogénique refroidissant à certaines valeurs qui permettront de ne pas avoir d'écoulement en couches

jusqu'à ce que le liquide soit presque complètement vaporisé. Il peut arriver que le refroidissement à l'hydrogène liquide ne puisse être utilisé et qu'il faille alors utiliser d'autres méthodes, comme le prérefroidissement au gaz froid (2).

3.15 IDENTIFICATION ET ÉVALUATION DES DANGERS

Comme autre aspect important de l'élimination des dangers, il y a l'identification, l'analyse et l'évaluation rapides des dangers possibles, de façon à pouvoir recommander des contre-mesures et adopter des méthodes preventives convenables.

L'Hazop (Étude de dangers et d'exploitabilité) est une technique recommandée et utilisée avec succès dans l'industrie pour l'identification systématique des dangers. L'Hazan ou analyse des dangers sert à établir la probabilité d'un sinistre et l'importance de ses conséquences. La principale étape de l'Hazan consiste à décomposer les événements qui mènent à un danger en éléments constitutifs. Le résultat de l'analyse est comparé à un objectif ou critère de façon à pouvoir évaluer le danger en question. Il faudrait utiliser l'Hazop et l'Hazan au stade de conception de tous les nouveaux systèmes.

Les techniques d'identification et d'évaluation des dangers sont décrites à la section 5.

4.0 CODES, NORMES, RÈGLEMENTS ET RÈGLES RECONNUES

La NASA, la US Air Force et plusieurs laboratoires nationaux ont, au fil des années, produit leurs propres manuels de règles de sécurité pour la conception et l'exploitation des systèmes à hydrogène liquide et gazeux. Du fait que l'hydrogène liquide de l'aérospatiale était presque toujours produit loin des endroits où on l'utilisait, il fallait mettre au point des techniques sécuritaires de transport routier et ferroviaire de cet hydrogène. Les producteurs d'hydrogène liquide, notamment la Linde, l'Air Products et la Liquid Air, ont mis au point, en tant que fournisseurs d'hydrogène liquide et gazeux en vrac à des entreprises industrielles, leurs propres normes, règles et codes d'exécution pour la production, le stockage, la manutention et le transport de l'hydrogène en toute sécurité.

C'est sur cette base que des règlements, normes et codes concernant les caractéristiques de l'équipement, les règlements d'expédition et les normes d'installation furent rédigés pour les réservoirs d'hydrogène, les remorques, les wagons-citernes et les postes de stockage. Les caractéristiques de l'équipement font état d'exigences relatives au type, à la capacité, à la pression d'exploitation et à la température des divers réservoirs. Les exigences fonctionnelles, les détails de conception et les modes de fabrication sont ensuite établis à partir de ces caractéristiques d'équipement. Les règlements d'expédition couvrent les démarches d'exploitation nécessaires en ce qui a trait au déplacement de l'équipement sur route ou sur rails. Les normes d'installation offrent des règles fondamentales relatives aux exigences fonctionnelles, au comportement et aux caractéristiques d'exploitation de l'équipement installé chez le client. Le fait d'appliquer ces règles permet d'avoir un équipement sécuritaire en matière de stockage et de distribution d'hydrogène.

Les codes et règlements actuels, notamment en ce qui a trait aux opérations avec l'hydrogène, traitent surtout de son transport. D'autres phases de ces opérations sont couvertes par des règlements plus généraux, dont une excellente énumération a été dressée récemment par Hord (1), (8). Les règlements actuels prescrits par la loi font habituellement référence à des normes et codes nationaux comme ceux de l'ANSI, l'ASME, l'ASTM, l'API, la NFPA, la CSA, l'ULC, etc. Les assureurs industriels identifient invariablement le code de l'ASME comme condition d'assurabilité des installations comportant des réservoirs sous pression.

4.1 CODES, NORMES ET RÈGLEMENTS AUX ÉTATS-UNIS

Divers comités interdisciplinaires, sur lesquels siégeaient des représentants de l'industrie, du gouvernement et du milieu universitaire, ont publié des règles de sécurité relatives à la production et à la manutention de l'hydrogène. Certains de ces documents, les plus complets, sont énumérés au tableau 4.1. Certains sont reconnus comme normes nationales et deviennent réglementaires et exécutoires lorsque prescrits par le U.S. Department of Transportation (DoT), les autorités de l'état, les autorités locales, etc. Les compagnies d'assurances adoptent ou indiquent habituellement des normes, des regles et des modes d'exécution en vigueur comme condition d'assurabilité des organismes industriels. Comme exemples de normes non réglementaires qui pourraient être adoptées par les autorités responsables, il y a celles de l'ASME, l'ANSI, l'ISA, la NFPA, l'UL, l'ASTM, etc. Les règlements actuels (réglementaires) et les codes et normes (non réglementaires) relatifs à l'hydrogène sont énumérés au tableau 4.2.

Les règlements fédéraux couvrent le transport inter-états de l'hydrogène et relèvent des divers services du U.S. Department of Transportation: la Federal Highway Administration pour le transport routier, la Federal Railroad Administration pour le transport ferroviaire, la Federal Aviation Administration pour le transport aérien et la U.S. Coast Guard pour le transport maritime.

Le Material Transportation Bureau (par l'entremise de l'Office of Hazardous Materials Operations) voit à ce que les règlements soient observés dans tous les autres domaines reliés au transport de l'hydrogène par véhicule. L'Office of Pipeline Safety Operations du Materials Transportation Bureau est l'organisme responsable du transfert par pipe-line des gaz et liquides dangereux. Ces services d'adoption et de mise en vigueur des règlements du DoT sont désignés comme tels à la Section 49, parties 102 et 107.301, du Code of Federal Regulations. Ce document d'ordonnance est cité comme 49 CFR 102 et 49 CFR 107.301 (8).

En plus des règlements et normes énumérés au tableau 4.2, il peut y avoir des règlements d'état et des règlements municipaux relatifs au stockage et au transport intra-état de l'hydrogène.

Les questions générales de sécurité dans l'industrie, y compris la production et la manutention des gaz inflammables comprimés et liquéfiés, sont soumises à l'OSHA PL 91-596 Réf. (H5).

4.1.1 Stockage de l'hydrogène

Les appareils sans joint de stockage d'hydrogène à haute pression doivent être conformes aux codes de l'ASME (Code Case 1205) et les cylindres et tubes doivent être conformes aux exigences du DoL, du CTC ou du DoT en ce qui a trait aux caractéristiques des matériaux, aux limites de pression, aux dispositifs de sécurité reconnus et aux contre-essais. Les installations tube-remorque doivent être conformes aux règles de la CGA et de la NFPA, ainsi qu'aux règles de tout autre organisme responsable local.

Les réservoirs de stockage d'hydrogène liquide doivent être conformes aux codes et aux exigences de l'ASME Section VIII, du DoT, de la NFPA et du CFR Section 49.

Les codes, normes et règles de sécurité relatifs à la conception et à l'exploitation du stockage de l'hydrogène comprimé et de l'hydrogène liquide font partie des tableaux 4.1 et 4.2.

4.1.2 Distribution de l'hydrogène

Un relevé des codes établis qui pourraient être valables pour l'hydrogène indique que le code de l'ANSI relatif aux canalisations sous pression (ANSI B31.8) et les normes minimales de sécurité relatives au transport du gaz naturel et autres gaz par pipe-line du Department of Transportation (DoT) pourraient s'appliquer sans modification aux systèmes de distribution d'hydrogène. Bien que l'on ne parle pas explicitement d'hydrogène dans ces normes, nous croyons que la définition de "gaz" qu'elles contiennent comprend l'hydrogène. Dans la norme B31.8 de l'ANSI, gaz est défini comme tout gaz ou mélange de gaz pouvant servir de combustible domestique ou industriel et distribué ou transmis à l'utilisateur par un système de canalisations. Dans la norme du DoT, gaz signifie le gaz naturel, tout gaz inflammable ou tout gaz qui est toxique ou corrosif. Ces deux normes étant les principaux codes relatifs à la distribution du gaz naturel, les systèmes à hydrogène nous semblent couverts par les règlements et ordonnances en vigueur.

Par contre, le National Fire Code comporte une section spéciale constituant la norme relative aux systèmes à hydrogène chez le consommateur. La norme ne traitant pas des systèmes de canalisations de distribution et ne couvrant que les systèmes à hydrogène relatifs à la livraison d'hydrogène par équipement mobile, il n'est pas certain qu'elle s'applique aux systèmes de livraison d'hydrogène au consommateur par pipe-line. Ce qui crée des problèmes c'est que la norme indique qu'on ne peut utiliser de fonte pour la conception des tuyauteries, des tubulures et des raccords. (Les deux autres normes nationales ne contiennent pas de règle analogue). Toutefois, il faut bien dire que la fonte est rarement utilisée dans les systèmes qui doivent satisfaire au National Fire Code (6).

Le transport par pipe-line des gaz comprimés inflammables (y compris, on le croit, l'hydrogène) doit satisfaire à la Section 49, parties 190-192, du CFR.

4.1.3 Transport de l'hydrogène

Le Transportation Safety Act de 1974 a accéléré la réorganisation du DoT et, par le fait même, la révision des codes réglementaires pertinents. Les caractéristiques de l'équipement de transport et les règlements relatifs au transport de l'hydrogène gazeux et liquide et au transporteur sont fournis à la Section 49, parties 170-179, du CFR. Ce code résume les règlements fédéraux relatifs au transport routier, ferroviaire, aérien et maritime de l'hydrogène. Le Répertoire no 32 de Graziano (H7) contient tous les règlements pertinents relatifs au transport qui sont énoncés à la Section 49 du CFR, à l'exception des règlements relatifs au transport de gaz (49 CFR (190-192)) et de liquides (49 CFR 195) par pipe-line.

Le DoT classe et traite l'hydrogène liquide comme gaz comprimé inflammable (Section 49, partie 172.5, CFR). Le transport aérien de l'hydrogène gazeux comprimé doit satisfaire à la Section14, partie 103, du CFR et aux règlements de l'AITA relatifs aux transporteurs commerciaux. On ne peut toujours pas transporter l'hydrogène liquide par voie aérienne.

Le transport maritime de l'hydrogène gazeux comprimé doit satisfaire à la Section 49 (172-179) du CFR et il est défendu de transporter de l'hydrogène liquide par bateau; toutefois, la NASA, grâce à un permis spécial délivré par

la U.S. Coast Guard, a déjà transporté de l'hydrogène liquide par barge sur des distances de 84 km, au large de la côte de la Louisiane et du Mississippi. Le DoT ne délivre plus de "permis spéciaux" mais permet des exceptions aux règlements relatives aux expéditions spéciales de substances dangereuses (y compris l'hydrogène liquide). L'Office of Hazardous Materials Operations du DoT peut permettre ces exceptions, lesquelles sont nécessaires pour le transport routier de l'hydrogène liquide par camion-remorque ou à l'aide de tout type d'équipement dont les caractéristiques ne sont pas couvertes par les normes du DoT (6) - voir CFR (107.1 - 107.125).

Les tableaux 4.1 et 4.2 donnent la liste des codes, règlements et règles de sécurité relatifs au transport de l'hydrogène gazeux et liquide.

4.2 CODES, NORMES ET RÈGLEMENTS AU CANADA

Voici une liste des codes, règlements et normes officiels ou officieux concernant l'installation des systèmes de manutention d'hydrogène au Canada. A defaut de codes, normes et règlements canadiens, les codes, normes et reglements américains pertinents sont habituellement observés.

A. Systèmes à hydrogène gazeux

A.1 Norme #50A de la NFPA - Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites

B. Systèmes à hydrogène liquide

B.1 Norme # 50B de la NFPA - Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites

B.2 Norme # 30 de la NFPA - Flammable and Combustible Liquid Codes

B.3 Norme #385 de la NFPA - Standard for Tank Vehicles for Flammable and Combustible Liquids

B.4 Norme #386 de la NFPA - Standard for Portable Shipping Tanks for Flammable and Combustible Liquids

C. Bâtiments industriels dans lesquels on se sert d'hydrogène

C.1 Code national du bâtiment du Canada

C.2 Codes provinciaux du bâtiment

C.3 Codes municipaux du bâtiment

C.4 Norme *220 de la NFPA - Standards on Types of Building Construction

C.5 Norme *68 de la NFPA - Guide for Explosion Venting

C.6 Code national de prévention des incendies du Canada

C.7 Codes provinciaux de prévention des incendies

C.8 Codes municipaux de prévention des incendies

D. Appareils sous pression contenant de l'hydrogène

D.1 Norme *B51-M- de l'ACNOR - Code de construction et d'inspection des chaudières et appareils sous pression

D.2 Section VIII, Division I, du Boiler and Pressure Vessel Code de l'ASME

D.3 Les règlements du Service provincial des appareils sous pression ont force de loi pour la construction des réservoirs de stockage d'hydrogène gazeux ou liquide et des réservoirs de transport d'hydrogène. Ces règlements font habituellement appel au code de l'ASME.

E. Systèmes électriques des installation à l'hydrogène

E.1 Code canadien de l'électricité, Partie I, norme *C22.1 de l'ACNOR

E.2 Règlements provinciaux

E.3 Norme *497 de la NFPA - Recommended Practice for Classification of Class I Hazardous Locations for Electrical Installations in Chemical Plants

E.4 Norme #77 de la NFPA - Recommended Practice on Static Electricity

E.5 Norme #78 de la NFPA - Lighting Protection Code

E.6 Norme #493 de la NFPA - Intrinsically Safe Apparatus and Associated Apparatus for Use in Class I, II and III Division I Hazardous Locations

E.7 Norme #496 de la NFPA - Purged and Pressurized Enclosures for Electrical Equipment in Hazardous (classified) Locations

E.8 Norme C22.2 No 145 (1972) de l'ACNOR - Motors and Generators for Use in Hazardous Locations Class I, Groups C and D Class II, Groups E, F and G

E.9 Norme C22.2 no 157 (1979) de l'ACNOR - Appareillage à sécurité intrinsèque et non incendiaire pour emplacements dangereux

F. Réseaux de canalisations d'hydrogène

F.1 Règlements provinciaux

F.2 Norme #B31.3 de l'ANSI/ASME - Code for Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping

F.3 Norme #Z184-M de l'ACNOR - Réseaux de canalisations de gaz

F.4 Norme #Z184S1 de l'ACNOR - Supplément No 1 à Z184M (1979)

G. Normes et codes divers

Les codes et normes suivants n'ont pas été rédigés que pour les systèmes à hydrogène. Toutefois, la conception et la construction des systèmes à hydrogène et de l'équipement de stockage et de manutention d'hydrogène ne peuvent que bénéficier de l'utilisation judicieuse de leur contenu.

G.1 Brochure #S-1 de la CGA, parties 1, 2 et 3 - Pressure Relief Device Standards

G.2 Norme #Z48.1 de l'ANSI - American Standard Method of Marking Portable Compressed Gas Containers to Identify the Material Contained

G.3 Norme #142 de l'UL - Standard for Steel Above Ground Tanks for Flammable and Combustible Liquids

G.4 Norme #842 de l'UL - Standard for Valves for Flammable Fluids

G.5 Norme C22.2 No. 152-1976 de l'ACNOR - Combustible Gas Detection Instruments

H Transport de bouteilles et contenants transportables d'hydrogène

H.1 Au Canada, l'organisme responsable est Transports Canada (Direction du transport des marchandises dangereuses)

H.2 Aux États-Unis, l'organisme responsable est le Department of Transport (DoT)

H.3 Règlements de la CCT relatifs au transport ferroviaire des marchandises dangereuses, stipulations 3A, 3AA et 3AAX concernant les bouteilles d'hydrogène et les tubes d'hydrogène utilisés comme éléments des remorques à tubes

H.4 Il est important de noter que les bouteilles et tubes d'hydrogène seront bientôt couverts par les codes B-339 de l'Association canadienne de normalisation. Ce code couvrira le transport ferroviaire et le transport routier. Actuellement, les règlements de la CCT ne s'appliquent directement qu'au transport ferroviaire, mais on les utilise pour le transport routier même si ce mode de transport n'est pas spécifié comme tel.

H.5 Norme B332.8-1978 de l'ACNOR, série 1, Freight Containers-Specification and Testing - partie III: Tank Containers for Liquids and Gases (ISO 1596/111-74).

I. Transport de l'hydrogène liquide

I.1 Equipement de transport d'hydrogène liquide - cet aspect sera couvert par la norme B-339 de l'ACNOR, Specifications for Highway Cargo Tanks. Toutefois, pour le moment, les modèles de remorques d'hydrogène liquide sont couverts par des exceptions aux États-Unis; on traite de ces exceptions dans le document HM-115 du US DoT et il est question de les intégrer aux règlements américains une fois le document H-115 approuvé. Jusqu'à ce que cet aspect soit couvert par la norme B-338 de l'ACNOR, on s'attend à ce que l'industrie observe les règlements américains et provinciaux dans le cadre des politiques générales de la Direction du transport des marchandises dangereuses (Ottawa) de Transports Canada.

J Codes reliés aux règles de l'art

En plus d'observer les règlements sus-mentionnés, il est important de suivre les règles de l'art, telles qu'énoncées dans les diverses brochures de la Compressed Gas Association. Comme brochures importantes, il y aurait les suivantes:

No de brochure de la CGA	Titre
C-1	Methods for Hydrostatic Testing of Compressed Gas Cylinders
C-2	Recommendations for the Disposition of Unserviceable Compressed Gas Cylinders
C-4	Method of Marking Portable Compressed Gas Containers to Identify the Material Contained
C-5	Cylinder Service Life Seamless High Pressure Cylinders
C-6	Standards of Visual Inspection of Compressed Gas Cylinders

C-7	Precautionary Labelling and Marking of Compressed Gas Cylinders
C-10	Recommendations for Changes of Service for Compressed Gas Cylinders
C-11	Recommended Practices for Inspection of Compressed Gas Cylinders at Time of Manufacture
C-14	Procedures for Fire Testing of DOT Cylinder Safety Relief Device Systems
C-15	Procedures for Cylinder Design Proof and Service Performance Tests
G-5	Hydrogen
G-5.3	Commodity Specification for Hydrogen
P-1	Safe Handling of Compressed Gas in Containers
P-6	Standard Density Data Atmospheric Gases in Hydrogen
P-7	Standard for Requalification of Cargo Tank Hose used in the Transfer of Compressed Gases
P-11	Metric Practice Guide for the Compressed Gas Industry
P-12	Safe Handling of Cryogenic Liquids
S-1-1	Pressure Relief Device Standards Part I - Cylinders for Compressed Gases
S-1-2	Pressure Relief Device Standards Part II - Cargo and Portable Tanks for Compressed Gases

S-1-3	Pressure Relief Device Standards Part III - Compressed Gas Storage Containers
V-1	American National Standard, Canadian Standards Association and Compressed Gas Association Standard Compressed Gas Cylinder Valve Outlet and Inlet Connections: ANSI B57.1 ACNOR B96
V-6	Standard Cryogenic Liquid Transfer Connections
V-7T	Tentative Standard Method of Determining Cylinder Valve Outlet Connections for Industrial Gas Mixtures
CGA-341	Tentative Standard Insulated Tank Truck Specifications CGA-341 for Cold Liquefied Gases

TABLEAU 4.1 RÈGLES (NON RÉGLEMENTAIRES) DE SÉCURITÉ CONCERNANT L'ÉQUIPEMENT ET L'HYDROGÈNE AUX ÉTATS-UNIS

ASPECT	RÉFÉRENCES **
Modes de manutention (comprend la sécurité relative à la production, au transport et à la distribution, à la formation du personnel, etc)	A1 - A25
Stockage	A1, A16, A17, A21, A22, A23, B1
Critères relatifs aux explosions	Résumés en A1 et C1 Voir également C2 et C3
Repérage, prévention, contrôle des fuites et des incendies	D1-D6, A1, G4 & G5
Installations	A1 et C1
Équipement mécanique	F1-F18
Équipement électrique	G1-G10

** Les références sont énumérés au tableau 4.3

TABLEAU 4.2 RÈGLEMENTS (RÉGLEMENTAIRES) RELATIFS AU TRANSPORT DE L'HYDROGÈNE AUX ÉTATS-UNIS

DISTRIBUTION D'HYDR. PAR	CARACT. D'ÉQUIP.	RÈGLEMENTS DE TRANSPORT
Bouteilles d'hydr. liquide (cap. inf. à 1000 lbs d'eau) - transp. routier seulement	CFR, Section 49, Partie 178.57, Réf. H2	CFR, Section 49, Parties 173.316, 177.823, 177. 840, Réf. H2
Wagons-citernes d'hydr., liquide	CFR, Section 49, Parties 179.400, 179. 401, Réf. H2	CFR, Section 49, Partie 173.316, Réf. H2
Camions-remorques d'hydrogène liquide	CGA*-341 et approb. du DoT avant la fabric. Réf. F17	Permis spécial du Hazardous Materials Regulation Board du DoT (voir CFR, Section 49, 173.33, 177.823, Réf. H2
Réservoir d'hydr. liquide, transp. aérien ou maritime	----------	Actuellement non permis (voir CFR, Sect. 14, Part. 103.7, 103.9 et CFR, Sec. 46, Partie 146.24), Réf. H3 et H4. Transp. par barge a été permis en vertu d'un permis spéc. du US Coast Guard Commandant
Pipe-line d'hydr. liquide	ANSI B31.8, B31.3*, B31.10*, Réf. H1,F5,F6	CFR, Sect. 49, Parties 190-192, Réf. H2
Bouteilles de gaz compr. - transp. routier ou ferr.	CFR, Sect. 49, Parties 173.34, 178.36, 178.37 Réf. H2	CFR, Sect. 49, Parties 173.302, 176.703, 177. 823, Réf. H2

TABLEAU 4.2 (suite)

DISTRIBUTION D'HYDR.	PAR CARACT. D'ÉQUIP.	RÈGLEMENTS DE TRANSPORT
Wagons-citernes de gaz comprimé	CFR, Sect. 49, Parties 173.31, 179.500, Réf. H2	CFR, Sect. 49, Parties 173.314, Réf. H2
Camions-remorques de gaz comprimé	CFR, Sect. 49, Parties 173.34, 178.36, 178.37 Réf. H2	CFR, Sect. 49, Parties 173. 301, 173.302, 177.823 Réf. H2
Réservoirs de gaz comprimé - tr. aérien	CFR, Sect. 49, Parties 173.34, 178.36, 178.37 Réf. H2	CFR, Sect. 14, Partie 103.9, Réf. H4 Bouteilles appr. par DoT sur avion de transport seul, charge max. de 300 lb (136 kg) de H_2 par bout. Voir également CAB No. 82 Réf. H2 et H6
Réservoirs de gaz comprimé - tr. marit.	CFR, Sect. 49, Parties 173.31, 173.34, 178.36 178.37, 179.500 et CFR, Sect. 46, Partie 146.24, Réf. H2 et H3	CFR, Sect. 46, Partie 146.24 Bout. appr. par DoT sur cargos seul. et wag-citernes appr. par DoT sur traversiers seul. Réf. H3
Pipe-line pour gaz	ANSI B31.8, B31.3* Réf. H1 et F5	CFR, Sect. 49, Parties 190-192, Réf. H2

TABLEAU 4.2 (suite)

Stockage d'hydrogène aux emplacements de consomm. sous forme de	Caract. d'équipement	Normes industrielles
Gaz comprimé	ASME * Section VIII	NFPA* 50A, Réf. A21 Divisions 1 et 2, Réf. F1 et F2
Liquide	ASME * Section VIII	NFPA, 50B, Réf. A22 Divisions 1 et 2, Réf. F1 et F2

Les questions générales de sécurité industrielle, y compris la production et la manutention des gaz inflammables, comprimés et liquéfiés, sont couvertes par OSHA PL 91-596.
Réf. H5

* Non réglementaires mais normes reconnues dans l'industrie aux États-Unis.

Remarque: les références sont énumérées au tableau 4.3

TABLEAU 4.3 RÉFÉRENCES POUR LES TABLEAUX 4.1 ET 4.2

Remarque: voici la signification des sigles utilisés,

CGA Compressed Gas Association Inc., 1235 Jefferson Davis Highway, Arlington, Va. 22202

ANSI American National Standards Institute, 1430 Broadway, New York, NY 10018

NFPA National Fire Protection Association, Publication Sales Department, 470 Atlantic Ave., Boston, MA 02210

ASME American Society of Mechanical Engineers, United Engineering Center, 345 East 47th Street, New York, NY 10017

UL Underwriter's Laboratories, Publication Stock, 333 Pfingsten Road, Northbrook, IL 60062

ISA Instrument Society of America, 400 Stanwix Street, Pittsburg, PA 15222

(A1) General Safety Engineering Design Criteria, Vol. 1, CPIA public. 194, (octobre 1971); également, Liquid Propellant Handling, Storage and Transportation, Vol. 3, CPIA public. 194 (mai 1972) - documents préparés par le comité sur la propulsion JANNAF du JANNAF Hazards Working Group et disponibles à la Chemical Propulsion Information Agency (CPIA) du John Hopkins University Applied Physics Laboratory, 8621 Georgia Avenue, Silver Spring, MD 20910; (également offert au public par le National Technical Information Service, Springfield, VA 22150: Vol. 1 Accession No. AD 889 763, Vol. 3 Accession No. AD 870 259).

(A2) Hydrogen Safety Manual, NASA Lewis Research Center, NASA Tech. Memo TM-X-52454 (1968).

(A3) On an investigation of hazards associated with the storage and handling of liquid hydrogen, Rapport final C-61092, Contrat AF 18(600) - 1687, préparé par Arthur D. Little Inc., DDC Access. No. AD 324194, 137 pages, (mars 1960).

(A4) Liquid hydrogen, a guide for the safe handling and storage of liquid hydrogen at LASL Facilities, Los Alamos Scientific Laboratory, P.O. Box 1663, Los Alamos, NM 87544

(A5) Weintraub, A.A., Control of liquid hydrogen hazards at experimental facilities: a review, health and safety laboratory, U.S. Atomic Energy Comm., New York, NY (mai 1965); également, Grumer, J., Strasser, A. et Van Meter, R.A., Principles for safe handling of liquid hydrogen, Bur. of Mines Tech. Rept. (juin 1967).

(A6) Chelton, D.B., Safety in the use of liquid hydrogen, livre, Technology and Uses of Liquid Hydrogen, éd. par R.B. Scott, W.H. Denton et C.M. Nicholls, pp 359-378 (The Macmillan Co., New York 1964).

(A7) Connolly, W.W., A practical safety standard for commercial handling of liquefied hydrogen, livre, Advances in Cryogenic Engineering 12, éd. par K.D. Timmerhaus, pp 192-197, (Plenum Press, New York, 1967).

(A8) Recommended materials and practices for use with cryogenic propellants, Aerospace Information Report, AIR 839B, 68 p. (Society of Auto. Engrs., avril 1969).

(A9) Cryogenics safety manual, a guide to good practice, (British Cryogenics Council, 16 Belgrave Square, London, SW1X8PT, 1970).

(A10) Hernandez, H.P., Safety guidelines for accelerator installations, Lawrence Radiation Laboratory Rept. No. UCRL-18555 (février 1969).

(A11) Handbook of Compressed Gases, Compressed Gas Association Inc., (Rheinhold Publishing Corp., New York, 1966.

(A12) Safe Handling of Compressed Gases in Containers, Brochure CGA P-1

(A13) Method of Marking Portable Compressed Gas Containers to identify the Material Contained, Brochure CGA C-4, également ANSI Z48.1-1954 (R-1971).

(A14) Guide to the Preparation of Precautionary Labeling and Marking of Compressed Gas Containers, Brochure CGA C-7.

(A15) Hydrogen, Brochure CGA G-5

(A16) Standard for Gaseous Hydrogen at Consumer Sites, Brochure CGA G-5.1

(A17) Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites, Brochure CGA G-5.2

(A18) Commodity Specification for Hydrogen, Brochure CGA G-5.3; voir aussi Hydrogen Commodity Specification, MIL-P-272013 (juin 1971); disponible du USN Supply Depot, 5801 Tabor Ave., Philadelphia, PA 19120

(A19) Lightning Protection Code, Brochure NFPA 78 (ANSI C5.1).

(A20) Static Electricity, Brochure NFPA 77

(A21) Standard for Gaseous Hydrogen Systems at Consumer Sites, Brochure NFPA 50A (ANSI Z292.2).

(A22) Standard for Liquefied Hydrogen Systems at Consumer Sites, Brochure NFPA 50B (ANSI Z292.3)

(A23) Standard for the Installation and Operation of Oxygen-Fuel Gas Systems for Welding and Cutting, Brochure NFPA 51; voir aussi Standard on Safety in Welding and Cutting, ANSI Z49.1.

(A24) Siewert, R.D., Evacuation areas for transportation accidents involving propellant tank pressure bursts, NASA TMX-68227 (nov. 1972)

(A25) Emergency services guide for selected hazardous materials (spills, fire, evacuation area), Dept of Transportation, Office of the Secretary, Office of Hazardous Materials, Washington, DC 20590 (avril 1974).

(B1) Zabetakis, M.G. et Burgess, D.S., Research on the hazards associated with the production and handling of liquid hydrogen, Bureau of Mines Report, RI-5707 (1961).

(C1) Hord, J., Explosion criteria for liquid hydrogen test facilities, Nat. Bur. of Standards (U.S.), NBS Report (février 1972).

(C2) Explosion Venting, Brochure NFPA 68.

(C3) Explosion Prevention Systems, Brochure NFPA 69.

(D1) Rosen, B., Dayan, V.H. et Proffit, R.L., Hydrogen leak and fire detection, NASA SP-5092 (1970)

(D2) Automatic Fire Detectors, Brochure NFPA 72E

(D3) Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, Volatile Solids, Brochure NFPA 325M

(D4) National Fire Codes, NFPA Volumes 1 et 2 (general fire-fighting and fire control)

(D5) Donnini, J.M., Hydrogen fire blink detector, U.S. Patent Application S/N 51477 (juillet 1970)

(D6) Custer, R.L.P. et Bright, R.G., Fire detection: the state of the art, Nat. Bur. Stand. (U.S.) Tech. Note Tn-839 (juin 1974)

(F1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division I, Pressure Vessels: cette référence a trait aux contenants de liquides et de gaz fixes et portables.

(F2) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 2, Pressure Vessels: Alternative Rules: cette référence a trait aux contenants de liquides et de gaz fixes seulement.

(F3) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX, Welding and Brazing Qualifications

(F4) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Nuclear Power Plant Components: série de normes pour les centrales et installations nucléaires

(F5) American National Standard Code for Pressure Piping, Petroleum Refinery Piping, ANSI B31.3 (ASME, New York): cette référence a trait aux tuyauteries pour liquides et gaz.

(F6) American National Standard Code for Pressure Piping, Cryogenic Piping Systems, ANSI B31.10 (en rédaction)

(F7) Vacuum insulated cryogenic pipes, some recommendations concerned with pipe and coupling design, (British Cryogenic Council, 16 Belgrave Square, London SW1X 8PT, 1972)

(F8) Safety Relief Device Standards, Part 1 - Cylinders for Compressed Gases, Brochure CGA S-1.1, Part 2 - Cargo and Portable Tanks for Compressed Gases, Brochure CGA S-1.2; Part 3 - Compressed Gas Storage Containers, Brochure CGA S-1.3

(F9) Recommended Practice for the Manufacture of Fusible Plugs, Brochure CGA S-4

(F10) Frangible Disc Safety Device Assembly, Brochure CGA S-3

(F11) Compressed Gas Cylinder Valve Outlet and Inlet Connections, Brochure CGA V-1 (aussi ACNOR B96 et ANSI B57.1)

(F12) Methods for Hydrostatic Testing of Compressed Gas Cylinders, Brochure CGA C-1

(F13) Standards for Welding and Brazing on Thin Walled Containers, Brochure CGA C-3

(F14) Cylinder Service Life, Seamless, High Pressure, Cylinder Specifications ICC-3, ICC-3A, ICC-3AA, Brochure CGA C-5

(F15) Standards for Visual Inspection of Compressed Gas Cylinders, Brochure CGA C-6

(F16) Standard for Requalification of DoT-3HT Cylinders, Brochure CGA C-8

(F17) Tentative Standard for Insulated Tank Truck Specification for Cold Liquefied Gases, Brochure CGA CGA-341

(F18) Voth, R.O., Safety of hydrogen pressure gauges, livre, Advances in Cryogenic Engineering, 17, éd. par K.D. Timmerhaus, p 182-187 (Plenum Press , New York, 1972)

(G1) Standard for Intrinsically Safe Apparatus for Use in Class I Hazardous Locations, Brochure NFPA 493

(G2) Standard for Purged and Pressurized Enclosures for Electrical Equipment in Hazardous Locations, Brochure NFPA 493

(G3) National Electrical Code, Chap. 5, Articles 500-501, Brochure NFPA 70

(G4) Fire Protection Equipment Directory (janvier 1977), disponible de l'UL

(G5) Hazardous Location Equipment Directory (janvier 1977), UL

(G6) Electrical Instruments in Hazardous Atmospheres, ISA-RP 12.1 (1960)

(G7) Intrinsically Safe and Non-Incendive Electrical Instruments, ISA-RP 12.2 (1965)

(G8) Instrument Purging for Reduction of Hazardous Area Classification, ISA-S12.4 (1970)

(G9) Electrical Safety Practices, Monographe ISA 113 (1972)

(G10) Magison, E.G., Electrical Instruments in Hazardous Locations, 2è édition, livre, 321 pages (Instrument Society of America, Pittsburgh, PA, 1972)

(H1) American National Standard Code for Pressure Piping, Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ANSI B31.8

(H2) Code of Federal Regulations, Section 49, Transportation, Parties 100 à 199, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 20402

(H3) Code of Federal Regulations, Section 46, Shipping, Parties 140 à 149, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 20402

(H4) Code of Federal Regulations, Section 14, Aeronautics and Space, Parties 60 à 199, U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 20402

(H5) Occupational Safety and Health Act of 1970, PL 91-596 (29 déc. 1970) des United States Statutes at Large, 91ème Congrès, seconde session, 84, partie 2, p 1590-1620 (U.S. Government Printing Office, Washington D.C. 20402, 1971)

(H6) Official Air Transport Restricted Articles Tariff No. 6-D, Civil Aeronautics Board (CAB) No. 82, Section I (p 14-15), Section II (p 53) et Section III - Partie A (p 94), publié par Airline Tariff Publishing Company, Dulles International Airport, P.O. Box 17415, Washington D.C. 20041

(H7) R.M. Graziano's TARIFF No. 32 (avec suppléments), Hazardous Material Regulations of the Department of Transportation by Air, Rail, Highway, Water and Military Explosives by Water including Specifications for Shipping Containers, publié par Bureau of Explosives, Association of American Railroads, 1920 L Street, N.W. Washington D.C. 20036 (novembre 1978).

5. IDENTIFICATION ET ÉVALUATION DES DANGERS

L'activité de recherche de problèmes futurs commence par une cause possible, laquelle mène à des écarts qui entraînent une conséquence. Il est impossible d'éliminer tous les dangers relatifs à une installation ou un système, mais pour les besoins de la sécurité, il faut absolument identifier et évaluer tous les dangers possibles. Pour pouvoir proposer des contre-mesures, il faut identifier les dangers. De toutes les méthodes d'identification des dangers, la plus fondamentale demeure l'expérience. Cette expérience se traduit ensuite par une série de codes ou de normes. L'identification de dangers et de problèmes qui gènent l'exploitation est souvent effectuée à partir d'une liste de contrôle. Les listes de contrôle sont utiles s'il y a peu ou pas d'innovations et si tous les dangers ont déjà été identifiés, mais elles le sont moins lorsque la conception et l'application sont nouvelles. De plus, les listes de contrôle ont le désavantage de ne pas comprendre les articles manquants, de sorte que le vérificateur ne se rend même pas compte de leur absence. Comme autre méthode utilisée avec succès dans l'industrie des procédés chimiques au cours de l'étape de conception des installations de procédés, il y a l'Hazop (Etude de dangers et d'exploitabilité). Il s'agit d'une méthode systématique qui laisse tout de même libre cours à la créativité et qui permet à des équipes pluridisciplinaires de se représenter les dangers pouvant survenir au cours des divers stades de la conception (29). La méthode permet aux gens de laisser libre cours à leur imagination et d'imaginer toutes sortes de conditions pouvant entraîner des dangers et des problèmes d'exploitation. Par contre, pour ne pas risquer de passer outre un point important, la méthode est utilisée de façon systématique; les divers éléments et types de danger sont étudiés individuellement, l'un après l'autre. Par conséquent, les personnes expertes dans le domaine en question peuvent faire appel à leurs connaissances et à leur expérience pour étudier le système élément par élément et écart de comportement par écart de comportement, sans craindre vraiment d'omettre certaines difficultés particulières. Il ne faudrait pas croire que l'Hazop peut remplacer les connaissances et l'expérience. La méthode ne fait que harnacher et conjuguer les connaissances et l'expérience de l'équipe de façon systématique.

Un compte-rendu détaillé des diverses études de dangers et d'exploitabilité et des analyses de dangers peut être obtenu de certaines références (23-32).

5.1 PLAN GÉNÉRAL D'IDENTIFICATION DES DANGERS

L'Étude de dangers et d'exploitabilité comporte les étapes suivantes:

Définition: Décrire le domaine d'étude et les dangers à étudier; constituer l'équipe et nommer un responsable.

Préparation: Recueillir les données nécessaires, préparer un plan et un calendrier des réunions.

Étude: Identifier les dangers.

Action subséquente: S'occuper des dangers.

L'Étude de dangers et d'exploitabilité se distingue des autres études du genre par ses méthodes d'identification des dangers (étape d'étude). L'étape d'étude ou d'identification des dangers fait appel aux trois démarches suivantes:

- Création d'une base de données des propriétés des matériaux à l'aide d'une liste de contrôle.

- Utilisation d'une liste de contrôle pour identifier les dangers globaux à partir d'un schéma fonctionnel.

- Utilisation de la méthode des "indicateurs" en fonction d'une conception schématique détaillée.

Base de données des propriétés des matériaux: On sait fort bien que bon nombre de matériaux utilisés ou produits dans l'industrie des procédés ont des propriétés dangereuses ou nuisibles. Il peut s'agir de dangers d'incendie, d'explosion et de toxicité ou encore d'effets nuisibles comme la production de poussières ou de mauvaises odeurs. En utilisant une liste de contrôle détaillée pour tous les matériaux pouvant faire partie d'une installation, il devrait être possible d'identifier tous les dangers et effets nuisibles relatifs aux propriétés des matériaux dans les conditions physiques anticipées. Non seulement peut-on avoir une description qualitative des dangers et effets nuisibles, mais il est également possible d'avoir des valeurs indiquant l'importance des divers dangers. A titre d'exemple, le danger "incendie" pourrait, entraîner une note indiquant que le matériau est inflammable, ainsi

qu'une fiche de données numériques relatives aux incendies, comme les limites d'inflammabilité, le point d'inflammabilité et la température d'inflammation spontanée. On peut également prendre note des données absentes, afin de les obtenir par la suite.

Étude de dangers et d'exploitabilité à l'aide d'une "liste de contrôle créatrice": Ici encore, on utilise une liste des dangers et effets nuisibles. Par contre, chaque élément de la liste de contrôle sert à vérifier diverses sections de l'installation présentée sous forme de schéma fonctionnel. A titre d'exemple, en associant la section de stockage à "incendie", on se représente cette section en feu. Les propriétés des matériaux de la section auront été établies à l'étape de préparation de la base de données. Cette méthode permet donc d'évaluer la probabilité d'incendie et d'établir des contre-mesures pertinentes.

Les dangers peuvent évoluer dans les deux sens. Par exemple, même s'il est presque impossible qu'une installation de stockage d'azote liquide prenne feu, les conséquences d'un incendie à proximité de l'installation peuvent être sérieuses. En utilisant tous les éléments d'une liste de contrôle pour chacune des sections d'un schéma fonctionnel, il devrait être possible d'identifier tous les dangers reliés aux sections individuelles et toutes les interactions nuisibles ou "effets en chaîne" possibles. Il devrait être également possible d'identifier les interactions dangereuses entre l'installation et son environnement.

Étude de dangers et d'exploitabilité à l'aide d'indicateurs: Cette méthode d'identification des dangers repose sur une hypothèse, à savoir que tous les dangers "intrinsèques" découlent d'écarts de ce que le concepteur visait. Par dangers "intrinsèques", on entend les dangers résultant du mauvais fonctionnement ou de la défaillance de petites sections de l'installation. Les écarts hypothétiques ou théoriques peuvent être créés à l'aide de mots précis ou phrases appelés "indicateurs". La méthode d'identification porte alors le nom d'étude de dangers et d'exploitabilité à l'aide d'indicateurs.

Tout écart spécifique, de ce qui était prévu, des diverses sections de l'installation peut être associé à un mot précis ou phrase appelé "indicateur". Par conséquent, en utilisant toutes les combinaisons possibles d'indicateurs

pour une section d'installation, on crée un climat qui permet de laisser libre cours à l'imagination et d'identifier tous les écarts et dangers afférents possibles. En répétant cette activité pour les diverses sections de l'installation, on peut identifier tous les dangers possibles.

En résumé, les "indicateurs" sont utilisés en fonction de l'objectif de conception et l'objectif de conception indique le rôle que l'on anticipe de l'équipement ou de la section d'installation. Certains "indicateurs" sont énumérés au tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 LISTE D'INDICATEURS

INDICATEURS	SIGNIFICATION	REMARQUES
NON ou NE PAS	Négation complète des intentions en question	Les objectifs visés n'ont aucunement été atteints mais rien ne s'ensuit.
PLUS MOINS	Augmentation ou diminution quantitative	Ont trait aux propriétés et aux quantités comme le débit et la température et aux activités "CHAUFFER" et RÉAGIR"
AUSSI BIEN QUE	Augmentation qualitative	Les objectifs de conception et d'exploitation ont tous été atteints, de même que certaines autres activités
PARTIELLEMENT	Diminution qualitative	Certains des objectifs ont été atteints; d'autres pas
INVERSE	Contraire logique d'une intention	Utilisé surtout pour des activités comme débit ou réaction chimique inverse. Peut aussi s'utiliser pour des substances, par exemple "POISON" au lieu d'ANTIDOTE ou isomères optiques "D" au lieu de "L"
AUTRE QUE	Substitution complète	L'objectif de départ n'a pas du tout été atteint. On obtient une toute autre chose

5.2 ANALYSE ET ÉVALUATION DES DANGERS

L'étude de dangers et d'exploitabilité est la première étape de la mise au point d'une installation ou d'un système. On identifie les dangers et les difficultés qui pourraient entraver l'exploitation efficace du système. L'identification des dangers doit être suivie de leur évaluation afin d'établir l'ampleur des mesures préventives nécessaires et de la protection des personnes et de la propriété. Toutefois, tout danger sérieux évident peut faire l'objet d'une analyse avant d'amorcer l'étude de dangers et d'exploitabilité.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des dangers. Il peut arriver qu'un danger puisse être éliminé facilement et à peu de frais; l'évaluation d'un danger est parfois basée sur une certaine expérience ou un code de règles d'exécution. Voici trois des méthodes usuelles d'analyse des dangers:

- Analyse globale des défaillances
- Analyse logique des étapes menant à une défaillance
- Analyse des dangers ou Hazan

5.2.1 Analyse globale des défaillances

Cette analyse est décrite par Leech (61). On se pose les questions suivantes:

Quelle est la défaillance étudiée?
Quel est le résultat de la défaillance?
Comment détecte-t-on la défaillance?
Que doit-on faire dans l'éventualité d'une défaillance?
Peut-on accepter une telle situation?

L'analyse globale des défaillances est une méthode plutôt grossière d'évaluation de la qualité. Si le système est jugé valable par suite d'une telle analyse, il est possible de calculer son degré de fiabilité globale à partir du degré de fiabilité des éléments, tout en tenant compte de la duplication des sections de système peu fiables en vue d'avoir une certaine redondance. Ces techniques peuvent être utilisées pour des installations complètes, pourvu que le traitement soit très général. On obtient de meilleurs résultats en étudiant les unités individuelles et leurs commandes, instrumentations et dispositifs d'alarme.

5.2.2 Analyse logique des étapes menant à une défaillance

Cette méthode fait appel à un diagramme logique des étapes qui peuvent mener à une défaillance spécifique. Ce diagramme est très utilisé en analyse des dangers pour établir, de façon logique, les événements qui mènent à une situation dangereuse. Ceci permet d'observer les diverses combinaisons d'événements nécessaires, ainsi que les diverses façons de rompre la série d'événements. La méthode permet de déterminer, à partir de certaines probabilités connues, la probabilité d'un événement dangereux. Les principaux éléments du diagramme logique sont les portes logiques. Les points de rencontre de deux branches du diagramme portent le nom de portes; les portes peuvent être des portes AND et des portes OR. La porte AND offre un événement de sortie si un ou plusieurs des événements d'entrée sont présents. Il existe d'autres types de portes. La figure 6.1 illustre un diagramme logique d'étapes menant à une défaillance; certaines des caractéristiques sus-mentionnées y apparaissent. Les événements primaires sont à l'origine d'étapes de défaillance qui mènent au danger en question.

Pour avoir une description de la méthode, telle qu'utilisée pour une usine chimique, consulter Powers et Tompkins (123); ceux-ci ont mis au point, à l'aide de l'algèbre de Boole, des programmes d'ordinateur qui permettent de décrire les modèles des unités.

Ce type de diagramme logique ne sert pas qu'à l'évaluation des risques. Il permet de visualiser les diverses routes menant à un danger donné et d'identifier les branches qui contribuent le plus au risque en question. Il indique la façon d'atténuer le risque, ainsi que les méthodes les plus efficaces.

5.2.3 Analyse des risques ou Hazan

Par Hazan, on entend l'utilisation de méthodes numériques visant à solutionner des problèmes de sécurité. Il s'agit de méthodes qui permettent de mesurer de façon quantitative des affirmations qui sont habituellement de nature qualitative.

Lorsqu'il est difficile d'évaluer un danger et de choisir la façon de l'éliminer, il faut vraiment évaluer la probabilité d'accident et l'étendue des conséquences. Ces valeurs sont ensuite comparées à un objectif ou critère.

Cette méthode porte le nom d'analyse des risques ou "Hazan". Il suffit parfois de quelques minutes d'évaluation pour arriver au résultat, mais il peut s'avérer nécessaire de procéder à des études qui dureront des semaines. L'analyse peut exiger l'élaboration de plusieurs diagrammes logiques d'événements pouvant mener à une défaillance, l'analyse de chacun de ces événements et le calcul de la probabilité de voir survenir divers événements d'intérêt majeurs. La méthode Hazan a été décrite par Lawley et Kletz (23, 25, 26, 27).

Chaque analyse des dangers comprend trois étapes:

- Evaluation de la fréquence de l'incident en question,

- Evaluation des conséquences pour:

  o les employés,
  o le public,
  o les installations et les profits;

- Comparaison des résultats de (1) et (2) à un objectif ou critère, afin de décider s'il faut prendre action en vue de réduire la probabilité de voir survenir l'événement ou d'atténuer ses conséquences ou s'il faut tout simplement ignorer le danger (du moins temporairement).

Les évaluations de (1) et (2) doivent être basées, dans la mesure du possible, sur des cas vécus. Mais il se peut qu'il n'y ait pas de tels cas, soit parce que le système est inédit ou que ce type d'incident est nouveau; il faut alors faire appel à des méthodes de synthèse.

En bref, les étapes de l'analyse des dangers sont:

o A quelle fréquence? o Avec quelles répercussions? o Et puis après?

5.2.4 Validité des méthodes Hazop et Hazan

En analyse des dangers, les erreurs ne découlent pas habituellement de données erronées mais bien d'erreurs de préparation du diagramme logique d'étapes pouvant mener à une défaillance - on omet souvent des séquences d'événements pouvant mener à un danger. Il est préférable de passer plus de

temps à bien identifier toutes les sources de danger qu'à améliorer la précision d'évaluation des sources qui ont déjà été identifiées.

En analyse des dangers, il faut veiller à utiliser des données pertinentes. Le fait d'utiliser, par exemple, des données sans vérifier si les conditions n'ont pas été modifiées, peut entraîner des erreurs graves. Les modifications de conception peuvent faire que les données antérieures ne soient plus utilisables. Les changements de politique d'entretien peuvent également affecter la validité des données. La fiabilité du personnel (concepteurs, préposés à l'exploitation, etc) s'avère le paramètre le plus difficile à évaluer avec une certaine précision. La partie exploitabilité de toute étude de dangers et d'exploitabilité est aussi importante que la partie dangers. On identifie plus souvent qu'autrement plus de problèmes d'exploitation que de dangers. Les techniques Hazop et Hazan partent du principe que les gestionnaires sont compétents et que l'installation sera exploitée et entretenue de la façon prévue par l'équipe de concepteurs et conformément aux règles de bonne gestion et de bon ingénierie. On suppose également que les systèmes de protection seront vérifiés sur une base régulière et, au besoin, réparés promptement.

En resumé, les techniques d'évaluation des dangers sont utilisées durant la vie de l'installation pour évaluer:
- si un risque est présent ou réel;
- le degré de protection nécessaire; et
- les alternatives qui permettront d'améliorer la sécurité des procédés tout en offrant le meilleur rendement économique.

En dépit des limites d'application de ces techniques, les milieux industriels ne cessent de faire de plus en plus appel à des méthodes quantitatives d'évaluation des dangers.

En faisant appel à une évaluation des dangers, les gestionnaires peuvent orienter leurs ressources vers les endroits stratégiques. Cette évaluation permet également de prendre des décisions rationnelles relatives au degré de protection nécessaire. De plus, les techniques d'évaluation des dangers offrent une base rationnelle qui permet d'établir, en fonction d'un maximum de bénéfices, l'ordre de priorité des améliorations à apporter à la sécurité

RÉFÉRENCES

1. Hord, J., "Is Hydrogen Safe?", NBS Technical Note 690, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado, octobre 1976.

2. Edeskuty, F.J., "Hydrogen: Its Technology and Implications", chapitre 5, Safety; CRC Press.

3. Chelton, D.B., "Safety in the Use of Liquid Hydrogen", Cryogenics Engineering Laboratory, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado

4. Kalyanam, K.M., Lyle A.R., "Bulk Storage of Hydrogen", dans le cadre d'une entente contractuelle avec le Conseil national de recherches Canada - no DSS-01SX. 31155-2-2602, juillet 1984

5. Stephen Foh, Martin Novil et al, "Underground Hydrogen Storage", rapport final, Institute of Gas Technology, projet 65013

6. Gregory, D.P., "A Hydrogen-Energy System", American gas Association, août 1972

7. Brochure CGA G-5, "Hydrogen", Compressed Gas Association Inc.

8. Hord, J., "Hydrogen Safety: An annotated Bibliography of Regulations, Standards and Guidelines", International Journal of Hydrogen Energy, vol. 5, no 6, p 579-584, 1980

9. Hord, J., "Explosion Criteria for Liquid Hydrogen Test Facilities", National Bureau of Standards (U.S.), rapport non publié (février 1972)

10. "General Safety Engineering Design Criteria", vol. 1, CPIA Publication 194 (octobre 1971), et "Liquid Propellant Handling, Storage and Transportation", vol. 3, CPIA Publication 194 (mai 1972)

11. W.E. Baker, V.B. Parr, R.L. Bessey et P.A. Cox, "Assembly and Analysis of Fragmentation Data for Liquid Propellant Vessels", NASA CR-134538 (janvier 1974)

12. W.E. Baker, J.J. Kulesz et al, "Workbook for Predicting Pressure Wave and Fragment Effects of Exploding Propellant Tanks and Gas Storage Vessels" NASA CR-134906 (novembre 1975)

13. Rosen, B., Dayan, V.H. et Proffit, R.L., "Hydrogen Leak and Fire Detection, a Survey", NASA SP-5092, 1970

14. Marr, J.W., "Leakage Testing Handbook", NASA CR-952, avril 1968

15. Custer, R.L.P. et Bright, R.G., "Fire Detection: the State-of-the-art", NASA CR-134642, NBS TN-839, juin 1974

16. Howard, W.B. et al, "Flame Arresters for High-hydrogen Fuel-air Mixtures" Loss Prevention 9, American Institute of Chemical Engineers, 1975

17. R.D. Witcofski, J.E. Chirivella, "Experimental and Analytical Analyses of the Mechanisms Governing the Dispersion of Flammable Clouds Formed by Liquid Hydrogen Spills", Hydrogen Energy Progess - IV, vol. 4, juin 1982

18. Edeskuty, F.J., Henshall, J.B. et Barlitt, J.R., "Cryogenics in the Nuclear Rocket Program", Cryogenics and Industrial Gases, juin 1969

19. "Fire Hazard Properties of Flammable Liquids, Gases, Volatile Solids", Brochure NFPA 325M, 1969

20. Ordin, P.M., "Review of Hydrogen Accidents and Incidents in NASA Operations", article présenté à la 9th International Energy Conversion Engineering Conference, San Francisco, 26-30 août, 1974

21. N.H.G. Daniels, B.C. Syrett et R.L. Jones, Materials requirements for advanced energy systems. New Fuels. vol. 3, Materials research needs in advanced energy systems using new fuels, rapport final ARPA-2484, contrat DAHC15-73-C-0313, préparé par le Stanford Research Institute, 110 p (juillet 1974), disponible au National Technical Information Service, Springfield, VA 22150, DDC Aceesion No. A004550

22. J.G. Hust, survey of materials for hydrogen service, chapitre 4, NBS Special Publication, Selected Topics on Hydrogen Fuel, édité par J. Hord, NBS SP-419 (mai 1975), disponible au U.S. Government Printing Office, Washington, DC 20402

23. "Hazard and Operability Studies", Chemical Industries Association, London 1977

24. Knowlton, R.E., "An Introduction to Hazard and Operability Studies", Chemetics International, Vancouver, 1981

25. Kletz, T.A., "Hazop and Hazan - Notes on the Identification and Assessment of Hazards", Institution of Chemical Engineers, London, 1983

26. Lawley, H.G., Hydrocarbon Process, vol. 55, no 4, p 247, avril 1976. Réimprimé dans Vervalin, C.H. éd., "Fire Protection Manual for Hydrocarbon Processing Plants", vol. 2, p 94, Gulf Publishing Co., Houston, Tex., 1981

27. Kletz, T.A. et Lawley, H.G., dans "High Risk Safety Technology", éd. par Green, A.E., chapitre 2.1, Wiley, London, 1982

28. Kletz, T.A., "Eliminating Potential Process Hazards", Chemical Engineering p 48-68, vol. 92, no 7, 1 avril, 1985

29. "Hydrogen Safety - An Assessment of the Safety Problems Associated with the use of Hydrogen as a Ground Transportation Fuel", Chemetics International Company, 1983

30. Flowsheeting for Safety - A guide on Safety Measures to Consider during the Design of a Chemical Plant", Institute of Chemical Engineers, Warwickshire, England

31. Leech, D.J., "Management of Engineering Design", Wiley, 1972

32. Powers, G.J. et Tompkins, F.C., 1973, Synthesis Strategy for Faul Trees in Chemical Processing Systems, CEP Loss Prevention, vol. 8, 91

33. Mikolowsky, W.T. et Noggle, L.W., The potential of liquid hydrogen as a military aircraft fuel, Proc. of the 1st World Hydrogen Energy Conf., Miami Beach, Floride, vol. III, éd. par T.N. Veziroglu, article 5C-31 (mars 1976)

34. Bowen, T.L., Investigation of hazards associated with using hydrogen as a military fuel, rapport 4541, Naval Ship Research and Development Center, Bethesda, MD 20084 (août 1975)

35. Strehlow, R.A. et Baker, W.E., "The Characterization and evaluation of accidental explosions", NASA CR-134779 (juin 1975); (disponible au National Technical Information Service, Springfield, VA 22151)

36. Edeskuty, F.J. et al, "A guide for the Safe Use of Hydrogen", rapport préparé pour l'UTDC de l'Ontario, no 325-CR-701-105.

ANNEXE A

Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène, du méthane et de l'essence

ANNEXE A: Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène, du méthane et de l'essence*** (réf !)

PROPRIÉTÉS	HYDROGÈNE	MÉTHANE	ESSENCE
Poids moléculaire	2,016	16,043	107,0
Pression de point triple, atm	0,0695	0,1159	-
Température de point triple, K	13,803	90,680	180-220
Point d'ébullition normal (PEN) K	20,268	111,632	310-478
Pression critique, atm	12,759	45,387	24,5-27
Température critique K	32,976	190,56	540-569
Masse volumique au point critique g/cc	0,0314	0,1604	0,23
Masse volumique de liquide au point triple g/cc	0,0770	0,4516	-
Masse volumique de solide au point triple g/cc	0,0865	0,4872	-
Masse volumique de vapeur au point triple g/m cube	125,597	251,53	-
Masse volumique de liquide au PEN g/cc	0,0708	0,4226	0,70
Masse volumique de vapeur au PEN g/cc	0,00134	0,00182	0,0045
Masse volumique de gaz à PTN g/m cube	83,764	651,19	4400
Rapport de masses volum.; liqu PEN/gaz PTN	845	649	156
Chaleur de fusion J/g	58,23	58,47	161
Chaleur de vaporisation J/g	445,59	509,88	309
Chaleur de sublimation J/g	507,39	602,44	-
Chaleur de combustion (faible) kJ/g	119,93	50,02	44,5
Chaleur de combustion (élevée) kJ/g	141,86	55,53	48
Chaleur spécifique de gaz (C) à PTN J/gK	14,89	2,22	1,62
Chaleur spécifique de liquide (C) J/gK	9,69	3,50	2,20
Rapport de chaleurs spécifiques (Cp/Cv) de gaz à PTN	1,383	1,308	1,05
Rapport de chaleurs spécifiques de liquides à PEN	1,688	1,676	-
Viscosité de gaz à PTN g/cm s	0,0000875	0,000110	0,00052
Viscosité de liquide à PEN g/cm s	0,000133	0,001130	0,002
Conductivité thermique de gaz à PTN mW/cm K	1,897	0,330	0,112
Conductivité thermique de liquide à PEN mW/cm K	1,00	1,86	1,31
Tension de surface de liquide à PEN N/m	0,00193	0,01294	0,0122
Constante diélectrique de gaz à PTN	1,00026	1,00079	1,0035
Constante diélectrique de liquide à PEN	1,233	1,6227	1,93
Indice de réfraction de gaz à PTN	1,00012	1,0004	1,0017
Indice de réfraction de liquide à PEN	1,110	1,2739	1,39
Vitesse du son adiabatique en gaz à PTN m/s	1294	448	154
Vitesse du son adiabatique en liquide à PEN m/s	1093	1331	1155
Facteur de compressibilité (Z) en gaz à PTN	1,0006	1,0243	1,0069
Facteur de compressibilité (Z) en liquide à PEN	0,01712	0,004145	0,00643
Constante des gaz (R) cc-atm/g-K	40,7037	5,11477	0,77
Module de vol. isotherme de liquide à PEN MN/m carré	50,13	456,16	763
Coeff. de dilatation volumique de liqu. à PEN 1/K	0,01658	0,00346	0,0012
Limites d'inflammabilité dans l'air, % vol.	4,0-75,0	5,3-15,0	1,0-7,6
Limites de détonation dans l'air, % vol.	18,3-59,0	6,3-13,5	1,1-3,3
Composition stoechiométrique dans l'air, % vol.	29,53	9,48	1,76
Energie min. d'inflammation dans l'air, mJ	0,02	0,29	0,24
Température d'inflammation spontanée K	858	813	501-744
Température d'inflammation en jet d'air chaud K	943	1493	1313

ANNEXE A: Propriétés physiques et chimiques de l'hydrogène, du méthane et de l'essence*** (réf 1) (suite)

PROPRIÉTÉ	HYDROGÈNE	MÉTHANE	ESSENCE
Température de flamme dans l'air K	2318	2148	2470
% d'énergie thermique irradiée de la flamme	17-25	23-33	30-42
Vitesse de combustion dans l'air à PTN cm/s	265-325	37-45	37-43
Vitesse de détonation dans l'air à PTN km/s	1,48-2,15	1,39-1,64	1,4-1,7
Coefficient de diffusion dans l'air à PTN cm/s	0,61	0,16	0,05
Vitesse ascentionnelle dans l'air à PTN m/s	1,2-9	0,8 - 6	nulle
Maximum d'écart expérimental sûr dans l'air à PTN cm	0,008	0,12	0,07
Distance d'extinction de flamme dans l'air à PTN cm	0,064	0,203	0,2
Distance d'induction de détonation dans l'air à PTN	L/D = 100	---	---
Seuil d'indice d'oxygène % vol.	5,0	12,1	11,6
Taux de vaporisation (régime permanent) de mares de liquide sans combustion cm/min	2,5-5,0	0,05-0,5	0,005-0,02
Taux de combustion de mares de liquide cm/min	3,0-6,6	0,3-1,2	0,2-0,9
Toxicité	Non toxique (asphyxiant)	Non toxique (asphyxiant)	Légèrement toxique (asphyxiant)
Energie d'explosion ** (g TNT)/(g combust.)	24	11	10
Energie d'explosion ** (g TNT)/(cc comb. liqu. PEN)	1,71	4,56	7,04
Energie d'explosion (kg TNT)/m cube comb. gazeux PTN)	2.02	7,03	44,22

PEN = Point d'ébullition normal
PTN = 1 atm. et 20 C (293,15 K)

* Les propriétés thermodynamiques sont celles du parahydrogène
** Valeurs théoriques
*** Les propriétés sont les moyennes arithmétiques de l'heptane et de l'octane normaux lorsque les valeurs pour l'essence n'étaient pas disponibles (sauf indication contraire)

ANNEXE B

Techniques de repérage des fuites et des incendies d'hydrogène

Relevé des techniques de repérage des fuites et des incendies d'hydrogène

Installation	Liquide (L) ou gaz (G)	Extér. ou int.	Pression ou tempér.	Capacité ou usage	Méthodes de détection de fuites	Détect. d'hydr portatifs	Détect. d'hydr. stationnaires: Fonct.	Têtes d'échant.	No de têtes	Détecteurs d'incendie	Remarques
Stockage	G	Extér.	2000&600 lb/po^2	120000 pi cu (2 remorques)	Bulles de savon en raccordant les remorques; rubans aux brides, inspection pour ruptures ou gonflements	Aucun	Aucun	----------	--------	Aucun	Songe à installer des rubans de dét. d'hydrogène
Cellule d'essai, caract. de mélange	G	Int.	600 lb/po^2	env 0,1 lb/s	Ruban non perforé aux brides, syst. de dét. semi-perm.	Aucun	Aucun	----------	--------	Aucun	
Production et util. d'hydr. pour l'hydrocraquage catal.	G	Extér.	--------	Pl. millions de pi cu /j.	Ruban et liqu. à bulles	Combustion catalytique (2 fabricants)	Aucun (sauf ruban)	----------	--------	Aucun	Hydrogène produit impur, d'où flammes plus faciles à voir que la flamme de l'hydrogène pur
Inst. d'hydr. liqu.	Les deux	Les deux	De 1900F à 250 psi à 40,5R à 10 psi	200000 gal/ jour, stockage de 680000 gal	Composé à bulles et ruban perforé	Combustion catalytique (2 fabricants)	Combustion catalytique	Aspiration	12	Aucun	Dét. aussi pour autres gaz comme Têtes placées en endroits fixes: liquefacteur, labo de chimie, salle de commande, compresseur de propane, salle de mach. électr. Alarme à 25 et 40%
Production d'hydr. pour hydrogénation	G	Les deux	1600-2000F à env. 200 psi à T amb. à 0,4 psi	$10-15 \times 10^3$ pi cu /mois stockage de 150000 pi cu	----------	Combustion catalytique	Aucun	----------	--------	Aucun (dét. UV pour contrôle de flamme de chaudière)	
Labo de recherche	L	Int.	1-5 atm	Quelques milliers de gallons	Dét. portatifs	Combustion catalytique	Combustion catalytique	Diffusion	50	Dét. de surchauffe dans le bâtiment	Conc. d'alarme à 4 et 10% LEL. Coupure autom. de l'électron. expér. près de l'hy et mise en marche de ventil. haute vite
Hydrogénation et autres procédés	G	Les deux	1 atm à 100 psi; 1 opér. à 2000 psi	30×10^6 pi cu / an. Stockage env 50000 pi cu.	Chute de press. et bulles de savon	Ultrasonique	Aucun	---------	---------	Aucun (détecteurs dans le bâtiment)	
Labo de propulsion	G (de L)	Les deux	0 à 3500psi	2×10^6 gal/an L (vaporisé) stockage de 100000gallons	---------	-------	Combustion catalytique	Aspiration	4 ou 5 par pièce	Aucun	Alarme à 50% LEL, si détection par un de 2 points d'échantill. en emplacement à l'intérieur. Points d'échantillonnage en partie supérieure de la pièce
Labo de tr. de chal.	Les deux	Extér. (part. fermé)	G-max 2000 psi à 500F L-max. 4000 psi	200 gal de L	Dét. portatif	Combustion catalytique	Aucun	--------	---------	Aucun	Flammes dans les aires d'essai pour brûler l'hydrogène qui pourrait s'échapper accidentellement
Stockage (min de 1/2 mille d'autres installations)	L	Extér.	-------	26000 gal perm., 150-5000 gal en contenants port.	Insp. visuelle de congél. au cours du transfert	Aucun	Aucun	--------	---------	Aucun	
Instal. de stockage (50-100 pi de l'inst. d'essai)	L	Extér.	-------	20000 gallons	----------	--------	Combustion catalytique	Diffusion	2	Thermiques; déclench. syst. d'irrigation	Un détecteur au-dessus du réservoir à stockage, un au-dessus du tuyau d'éch
Recherche en tubes de choc	G	Int.	50000 psi (intermittent)	----------	----------	---------	Combustion catalytique	Diffusion	5	Aucun	Empl. de détecteurs: 1 au sommet de la pièce, 12-15 pi. au-dessus de l'équi 3 le long du tube, env. 4 po. au-dessu 1 dans le tuyau d'échappement

Techniques de repérage des fuites et des incendies d'hydrogène (suite)

Installation	Liquide (L) ou gaz (G)	Extér ou int	Pression ou temper	Capacité ou usage	Méthodes de détection de fuites	Détect. d'hydr portatifs	Det. d'hydr. stationnaires: Fonct.	Têtes d'échant.	No de têtes	Detecteurs d'incendie	Remarques
Four de brasage	G	Int.	1 psi à 1200 à 2000 F	3000 pi cu à 1 h. max	Composé à bulles et det. portatif	Conductivite thermique	Aucun	----------	-------	Aucun	Fuites à haute temperature dans le contenant à l'inter du four, au-dessus de la temp d'inflammation spontanee
Stockage	G	Ext	2000 psi	-------	----------	Aucun	Aucun	----------	-------	Aucun	
Recherche en propulsion	Les deux	Ext. (part. ferme)	-----	250 gal de L	Dét. portatif	Combustion catalytique	Comb catalyt	Diffusion	4	Aucun	Detecteurs sous le toit dans ou près des aires à hydrogene
Production et utilisation d'hydr pour hydrocraquage	G	Ext.	------	Millions de pi cu /jour	Ruptures en ruban de plastique, detect portatifs	Combustion catalytique (2 modeles)	Aucun	----------	-------	Aucun	Détection visuelle des incendies accidentels, petits feux vus la nuit. Fuites parfois diluées par la vapeur
Labo. d'etude des flammes	G	Int.	------	Faible	----------	---------	Comb catalyt	Diffusion	4	Aucun	Emplacements: 3 det. en labo., deux dans des coins, (14 pieds au-dessus du plancher), 1 au-dessus du brûleur; 1 det dans la salle de commande
Stockage	L	Ext.	------	200000 et 20000 gal	----------	Aucun	Aucun	--------	-------	Aucun	
Essai de moteurs de fusée	Les deux	Ext.	1500 psi	50000 gal	Compose à bulles sous press. d'hel detecteur portatif	Combustion catalytique	Comb. catalyt	Diffusion	2	Tête infrarouge	Têtes de dét. fixées au câble, peuvent être déplacées et centrées autour de l'installation d'essais
Pompe et stockage haute pression	G	Ext.	5000 psi	Bouteille de 5 po x 30 pi	----------	Aucun	Aucun	--------	-------	Aucun	
Tube de choc (en construction)	G	Int.	12000 psi jusque 600K	----------	----------	----------	Comb catalyt	Diffusion	------	Aucun	
Compresseur pour pipe-line	G	Part. ferme	5000 psi	----------	----------	----------	Comb	Diffusion	4	Aucun	Dét. au-dessus des compresseurs et dans le toit. Remplacent le syst à tête aspirante
Essais de moteurs de fusée	L	Les deux	--------	15000 gal/mois	----------	Combustion catalytique	Comb. catalyt	Aspiration	8	Contrôleur de flamme dans l'epurateur d'évacuation	Points d'échantillonnage de 0 à 100 pi de l'analyseur 1 à 10 pi au-dessus du réservoir d'hydr. liquide; 1 à 12 pi au-dessus du moteur; 4 dans l'épurateur d'évacuation, 1 dans la fosse de combustible et 1 dans le reservoir de stockage d'hydr. G
Stockage et vapor. d'hydr. L	Les deux	Ext.	------	5000 gal + 20 bout. d'hydr. G (2 x 20 pi)	----------	---------	Comb catalyt	Diffusion	3	Dét. therm. declenchant l'extincteur	Têtes à diffusion au-dessus du réservoir de stockage, du tuyau d'échappement et du vaporisateur
Production et utilisation d'hydr pour réactions	G	Les deux	3-8 psi à T ambiante à 5000 psi à 900 F	7×10^{-3} pi cu / jour; 100000 pi cu de stockage	---------	Combustion catalytique, ultrasons	Comb catalyt.	Aspiration	4	Aucun	Alarme à 20% de LEL, arrêt automatique de certains appareils à une concentration locale de 40% de LEL

Techniques de repérage des fuites et des incendies d'hydrogène (suite)

Installation	Liquide (L) ou gaz (G)	Extér ou int	Pression ou temper	Capacité ou usage	Méthodes de détection de fuites	Détect. d'hydr portatifs	Dét. d'hydr. stationnaires			Détecteurs d'incendie	Remarques
							Fonct.	Têtes d'échant.	No de têtes		
Base de lancement de véhicules de l'espace	Les deux	Ext	--------	Centaines de milliers de gallons	----------	-------	Comb catalyt	Diffusion	154	Dét. UV, tube G-M (env. 60), fil thermique aux brides, etc. (42)	Sortie de chaque dét. vers tableaux en centre de commande et vers enregistreur d'événements. Alarme des détect. d'hydr. à 25% de LEL. On envisage utiliser un téléviseur infrarouge
Vérif. cryogen de matériaux (6 cellules d'essai ouvertes)	L	Les deux	Pression ambiante	2000 gal/mois	----------	Combustion catalytique	Comb catalyt	Aspiration	6	Dét. ultrasonique (à contrôle de chaudière) à une cellule d'essai fermée	Dét. de fuites stationnaires, un au-dessus de chaque cellule, indiquent quand on peut entrer en toute sécurité (moins de 20% de LEL)
Essais de struct. et de moteurs de fusée	Les deux	Ext	-------	Centaines de milliers de gallons	----------	Combustion catalytique	Comb. catalyt	Diffusion	-----	Détecteurs UV (tubes G-M), fil thermique	Seule fausse alerte d'incendie due à un chalumeau de soudage
Essais de moteurs de fusée avec simul. d'altitude	L	Int	-------	-------	----------	--------	Comb catalyt	Aspiration	-----	Envisage d'installer un téléviseur infrarouge	
Procédés d'hydrogénation	G	Les deux	9-15 psig et 150 psig	80000 pi cu à l'heure	Bulles de savon	Ultrasons, combustion catalytique	Aucun	--------	-----	Aucun	Certaines difficultés avec un dét. ultraviolet en raison du niveau de bruit de fond
Product. et util. d'hydr. pour hydrocraquage et autres procédés	G	Ext	Jusque 3000 psi à plusieurs cent. de deg. F	Jusque 14×10^4 pi cu par jour	Ruban, ruban avec trous et compose à bulles	Combustion catalytique	Aucun	--------	-----	Aucun	Détection visuelle des feux, habituellement la nuit
Essais de propulsion (études de combustion)	G	Int	600 psi	Jusque 1 lb/s pour 15-20 s	----------	--------	Comb catalyt	Diffusion	1	Dét. UV de flamme pour assurer l'inflammation	Fort débit d'air causent des fausses alarmes du dét. fixe d'hydr., aide en enveloppant la tête dans un tissu d'amiante. Tête à 10-20 pi au-dessus et à côté de la région de flamme

ANNEXE C

Bibliographie

ANNEXE C: Bibliographie

Codes, normes et règlements

Advisory Panel on Experimental Fluids and Gases, NASA Lewis Research Centre, Hydrogen Safety Manual, NASA TM-X-52454, 1968

Présente des normes et des règles d'exécution acceptables relatives aux exigences minimales de sécurité pour la plupart des aspects de manutention et d'utilisation de l'hydrogène qui font appel au personnel et à l'équipement. Ne traite pas de situations qui présentent des dangers supplémentaires, comme les endroits de forte activité ou offrant de faibles marges de sécurité.

Air Product and Chemicals Inc., Liquid Hydrogen Safetygram, Box 538, Allentown, PA 18105

Traite brièvement de normes, de règlements et de règles relatifs au stockage, à la manutention et au transport sécuritaire de l'hydrogène liquide; il s'agit d'un dépliant de quatre pages.

American Society for Testing and Materials, Cryogens and Gases: Testing Methods and Standards Development, STP 537.

Ce document comprend quatre articles traitant de problèmes et d'exigences de normes relatifs aux gaz et aux liquides cryogéniques. On traite notamment des aliments surgelés, des contenants de carburants, des combustibles à fusée cryogéniques et gaz de pressurisation, des mélanges ox. liqu./gaz naturel liqu., de la conception de l'équipement cryogénique et des essais et des propriétés de transport des fluides cryogéniques.

Association canadienne du gaz, première modification à CAN1-B149.1-M80, Installation des dispositifs et récipients de gaz naturel comprimé sur les véhicules circulant sur les voies publiques et exigences relatives aux centres de ravitaillement, octobre 1982.

Traite de l'installation des dispositifs et récipients de gaz naturel comprimé sur les véhicules circulant sur les voies publiques et des exigences relatives aux centres de ravitaillement en gaz naturel comprimé.

Association canadienne du gaz, première modification à CAN1-B149.2-M80, Installation des dispositifs et récipients de propane sur les véhicules circulant sur les voies publiques.

Traite de l'installation des dispositifs et récipients de propane sur les véhicules circulant sur les voies publiques.

Association canadienne du gaz, norme préliminaire12.1-1981, Composants du réseau d'alimentation des véhicules fonctionnant au propane, novembre 1981.

Cette norme traite de la construction et du comportement des composants du réseau d'alimentation au propane ajouté aux véhicules à moteur à combustion interne qui circulent sur les voies publiques.

Association canadienne du gaz, norme préliminaire 12.3-1981, Composants du réseau d'alimentation des véhicules fonctionnant au gaz naturel, juin 1981.

Cette norme traite de la construction et du comportement des composants du réseau d'alimentation au gaz naturel ajouté aux nouveaux et anciens véhicules à moteur à combustion interne qui circulent sur les voies publiques.

Fuels Safety Branch, Ministry of Consumer and Commercial Relations, Province d'Ontario, norme 1/82 sur le propane, Installation of Propane Carburation Equipment and Tanks on Highway Vehicles, mars 1982.

Cette norme traite de l'installation de l'équipement d'alimentation et réservoirs de propane sur les véhicules circulant sur les voies publiques. Elle ne traite pas de l'installation OEM de l'équipement, conformément à la norme fédérale MVSS301.

Gouvernement de l'Ontario, Energy Act, chapitre 139, Règlements 288, 289, 290, 291, 292, janvier 1982.

Règlements ontariens sur l'énergie, y compris le Code du mazout, les pipelines de transport de gaz, le Code d'utilisation du gaz, les pipe-lines de transport de pétrole et le Code de manutention, d'utilisation et de stockage de propane.

Hord, J., National Bureau of Standards, Hydrogen Safety: An Annotated Bibliography of Regulations, Standards and Guidelines, Int. J. Hydrogen Energy, volume 5, pages 579-584, Pergamon Press Ltée, 1980.

Ce document contient un tableau des règlements fédéraux relatifs à la distribution de l'hydrogène gazeux et liquide et à la fabrication et l'entretien de l'équipement utilisé pour l'hydrogène. Un second tableau de références a trait aux normes et règles non réglementaires relatives à la sécurité et aux caractéristiques de l'équipement et des installations pour pour l'hydrogène.

Ludtke, P.R., National Bureau of Standards, Register of Hydrogen Technology Experts, préparé pour la NASA, NASA CR-2624, octobre 1975.

Contient les noms d'environ 235 individus qui sont des experts des diverses technologies reliées a l'hydrogène. On énumère également près de 90 organismes. Chaque individu est énuméré avec l'organisme auquel il appartient, l'adresse et son principal domaine d'expertise.

Ministry of Government Services, Gouvernement de l'Ontario, Ministerial Responsability for Acts, Alan Gordon, imprimeur, janvier 1983.

Liste des lois provinciales, accompagnées des ministères responsables.

Minister of Transportation and Communications, Gouvernement de l'Ontario, Loi 93, Dangerous Goods Transportation Act, 1981, imprimée par Alan Gordon, Toronto, 1981.

Règlements officiels relatifs au transport des marchandises désignées dangereuses, comme (i) les explosifs, (ii) les gaz comprimés, réfrigérés, liquéfiés ou pressurisés et dissous, (iii) les liquides inflammables et combustibles, (iv) les solides inflammables et combustibles, (v) les substances oxydantes, (vi) les substances toxiques et infectieuses, (vii) les substances corrosives.

National Fire Protection Association, Codes and Standards, Répertoire 1983.

Comprend les codes nationaux de prévention des incendies, des brochures, les publications relatives aux codes, un index du répertoire de la bibliothèque des codes nationaux de prévention des incendies, des renseignements concernant les commandes.

Administration de la sécurité

Balthasar, W. Schoedel, J.P., Hydrogen Safety Manual - OSGPB84-163468, Source corp. - Commission des communautés européennes - Luxembourg, Journal, vol. 08410. Date de rapport: 1983. Rapport EUR-8396-EN.

Cet ouvrage traite des questions de sécurité en fournissant des méthodes, des marches à suivre et des exemples de manutention sécuritaire de l'hydrogène.

Brown, W.J., NASA Lewis Research Centre, Safety Management of Comples Research Operations, Fifth International System Safety Conference, Denver, CO, 30 juillet 1981.

Description du programme d'administration de la sécurité au Lewis Research Centre. Ce programme couvre des sources de dangers possibles comme les combustibles haute énergie, les hydrocarbures comme combustibles, les système haute pression, les systèmes haute tension, les produits chimiques toxiques, les substances radioactives, la machinerie qui tourne a grande vitesse et les lasers à grande puissance.

Custer, R.P.L., Bright, R.G., National Bureau of Standards, Fire Detection: The State-of-the-Art, préparé pour la National Aeronautics and Space Administration, juin 1974, COM-74-50638

On traite des règles de l'art relatives à la technologie de repérage d'incendies, en fonction de la nature des incendies, des modes de repérage utilisés, des méthodes d'essai, des exigences de comportement et des exigences des divers codes. Il est également question de l'orientation actuelle de l'élaboration de codes et de recommandations pour l'avenir.

Edeskuty, F.J., Bartlit, J.R., Carlson, R.V., Stewart, W.F., Cox, K.E., Rider, R., Williams, M., Los Alamos Scientific Laboratory, Hydrogen Safety and Environmental Control Assessment, 1 novembre 1978 - 30 septembre 1979, Rapport final, LA-8225-PR.

On identifie les problèmes de sécurité et d'environnement en ce qui a trait à l'utilisation de l'hydrogène et aux atttentes du public. On établit un programme coordonné qui permettrait de résoudre ces problèmes; ce programme comporte des éléments d'évaluation et d'analyse dans divers domaines.

Factors affecting the broadened use of hydrogen - NAS 09-44 76N18661, JJ574450 Jet Propulsion Laboratory, California Inst. of Technology, Pasadena, Calif.

On traite du futur rôle de l'hydrogène. Il est question de facteurs spécifiques comme les problèmes de stockage, de transport et de distribution; la sécurité et la compatibilité des matériaux; les effets sociaux et environnementaux d'une utilisation accrue de l'hydrogène et questions économiques relatives à une utilisation accrue de l'hydrogène.

Grilly, E.R., Kerr, E.C., Edeskuty, F.J., Stearns, J.G., Burch, C.A., Los Alamos Scientific Laboratory Liquid Hydrogen Safety Committee, Liquid Hydrogen: A Guide for the Safe Handling and Storage of Liquid Hydrogen at LASL Facilities, 15 juin 1962.

On traite des aspects très généraux de la sécurité relative à l'hydrogène liquide. Certains exemples (visant à illustrer et non détaillés) sont donnés. On suppose que le lecteur a accès à des données concernant la sécurité en ce qui a trait aux règles de stockage et d'utilisation, aux produits chimiques, aux sources radioactives, aux dangers reliés à l'équipement, à la manutention et au transport, aux installations usuelles, etc.

Knowlton, R.E., Chemetics International Company, An Investigation of the Safety Aspects in the Use of Hydrogen as a Ground Transportation Fuel.

Cet article traite de la stratégie, du mode d'identification des dangers et des résultats obtenus dans le cadre d'une étude visant à identifier les dangers associés à divers systèmes possibles de transfert, de stockage, de distribution et de ravitaillement d'hydrogène. Certains scénarios font appel à un poste de ravitaillement en hydrogène liquide.

Knowlton, R.E., Chemetics International Ltée, An Introduction to Hazard and Operability Studies, The Guide Word Approach, février 1981.

Introduction à la technique des "indicateurs" des études de dangers et d'exploitabilité dans l'industrie des procédés. Cette méthode découle de la conception détaillée des installations au cours de laquelle on se représente des écarts à l'aide d'indicateurs afin de procéder à une recherche systématique des dangers et difficultés d'exploitation possibles.

Knowlton, R.E., Imperial Chemical Industries Ltée, Hazard and Operability Studies and their initial applications in research and development, Research and Development Management, vol. 7, no 1, octobre 1976, éd. par A.W. Pearson.

Décrit une méthode visant à assurer une sécurité des opérations dans l'industrie des procédés, ainsi qu'une autre application de cette méthode dans le domaine de la recherche et du développement.

Knowlton, R.E., Chemetics International Company, Hydrogen Safety, an assessment of the safety problems associated with the use of hydrogen as a ground transportation fuel, ébauche de rapport final, tomes 1 et 2, préparé pour le Conseil national de recherches Canada, janvier 1983.

Ce document traite du transfert, de la distribution et du stockage de l'hydrogène gazeux ou liquide. Des conceptions schématiques de systèmes pertinents sont établies et soumises à des études de dangers et d'exploitabilité. Les dangers sont identifiés et on fait certaines recommandations en vue de les éliminer, de les contrôler ou de les contrer.

Krupka, M.C., Edeskuty, F.J., Stewart, W.F., Williamson, K.D., Los Alamos Scientific Laboratory, A Guide to the Safe Use of Hydrogen, préparé pour l' Urban Transportation Development Corporation, raport 325-CR-701-105.

Il s'agit d'un manuel de règles de sécurité relatives à l'utilisation de l'hydrogène gazeux et liquide au cours des stades de conception, de développement, d'essais et de fabrication de véhicules de transport public mus à l'hydrogène.

Liquefied gaseous fuels safety and environmental control assessment program progress report - NAS 05-28 80N14266; DM226776 Department of Energy, Washington DC, contrats EP-78-0-03-2057, EP-78-0-05-6020, EP-78-0-02-4734, EE-77-S-02-4204, EE-77-S-02-4447, EE-77-S-02-4548, EY-76-0-06-1830. Rapport DOE/EV-0036. Disponible: NTIS 725 P. HC A99/MF A01.

On traite d'études sur les aspects de la sécurité et de l'environnement des combustibles gazeux liquéfiés, y compris le gaz naturel, le gaz de pétrole, l'hydrogène et l'ammoniac. Comme dangers reliés à la manutention, au stockage et au transport, il est question des déversements et des incendies

Process Safety Management (Control of Acute Hazards) - Chemical Manufacturers Association, 2501 M Street, NW, Washington DC 20036, mai 1985.

On compare les diverses méthodes d'identification et d'évaluation des dangers. Les étapes relatives à la conception, à la mise en oeuvre et à l'exploitation d'une installation sont également décrites. On illustre également la technique HAZOP (étude de dangers et d'exploitabilité) d'identification des dangers pour un poste de pompage d'hydrogène imaginaire

Schmuker, R., Les aspects de la sécurité d'une vaste économie d'énergie reliée a l'hydrogène - NAS 06-31 78A18857, Atelier international sur l'hydrogène et ses perspectives d'avenir, Liège, Belgique, 15-18 novembre 1976, compte-rendu, volume 2, en français.

On traite des contraintes de profitabilité sur les aspects de la sécurité d'une vaste économie d'énergie reliée à l'hydrogène. On examine en détail les usages de l'hydrogène et les contacts possibles avec les humains, en portant une attention toute particulière aux caractéristiques d'inflammation et de combustion de l'hydrogène. Trois méthodes visant à assurer la sécurité sont proposées - l'éducation, l'amélioration des méthodes préventives et les moyens passifs.

Theyskens, A., Aspects relatifs à la sécurité et à l'environnement dans le cadre de la production et l'utilisation de l'hydrogène à la nouvelle raffinerie Esso d'Anvers - NAS 06-44 78A18854, Atelier international sur l'hydrogène et ses perspectives d'avenir, Liège, Belgique, 15-18 novembre 1976, compte-rendu, vol. 2 (A78 -18826 06-44). En français. Corp. Auth-Esso Belgique, Anvers, Belgique.

Dangers reliés aux propriétés de l'hydrogène

Arthur D. Little Inc., Rapport final, Electrostatic Hazards Associated with the Transfer and Storage of Liquid Hydrogen, préparé pour la NASA, George C. Marshall Space Flight Centre, mai 1961, C-61092.

Le rapport donne un résumé des résultats d'un programme expérimental visant à étudier les dangers possibles de la production et de l'accumulation de charge statique dans les systèmes de stockage et de transfert d'hydrogène liquide bien mis à la terre.

Baker, W.E., Parr, V.B., Bessey, R.L., Cox, P.A., Southwest Research Institute, Assembly and Analysis of Fragmentation Data for Liquid Propellant Vessels, préparé pour le NASA Lewis Research Centre, NASA CR-134538.

On a recueilli et analysé les données relatives à la fragmentation par suite de l'explosion de réservoirs de combustibles à fusée liquides. Le rapport présente des méthodes qui permettent de prévoir la distribution des fragments à partir du genre de combustible, de la quantité de combustible, du type d'accident et d'autres paramètres.

Edeskuty, F.J., Safety Chapter, Hydrogen: Its Technology and Implications, volume II, Transmission and Storage of Hydrogen, CRC.

On discute des propriétés de l'hydrogène, des dangers qui en découlent et de la façon d'éviter ces dangers aux stades de conception et d'exploitation des systèmes de stockage, de manutention et de transport d'hydrogène.

Edeskuty, F.J., Safety - NAS 02-28 81A11756, Hydrogen: Its Technology and Implications, volume 4. (A81-11751 01-44) Boca Raton, Fla., CRC Press Inc., 1979, p 203-219, étude subventionnée par l'ERDA. Corp. Auth-California, Univeristy Los Alamos, N-Mex.

On passe en revue les questions de sécurité relatives à l'exploitation de l'hydrogène, à la conception de l'équipement, à la formation du personnel d'exploitation, aux codes et règlements. On traite des propriétés de l'hydrogène, y compris son inflammabilité, sa portée de détonation, son émissivité de flamme et sa chaleur de vaporisation; on décrit les dangers de combustion dans les enceintes fermées et l'affaiblissement de l'équipement de structure par fragilisation. On illustre des méthodes d'élimination

de dangers comme la suppression de l'air avant l'exploitation, l'aération des espaces voisins et la prévention des fuites. Les codes en vigueur doivent tenir compte de la contraction thermique des matériaux de construction qui servent à contenir l'hydrogène liquide.

Hord, J., Department of Commerce, National Bureau of Standards, Correlations for Predicting Leakage Through Closed Valves. NBS Technical Note 355, R-433, août 1967.

On traite de la corrélation de paramètres de façon à prévoir les fuites de fluides par les sièges de soupape, les raccords soudés et filetés, les joints, etc. On étudie diverses formules et on établit deux méthodes de corrélation des fuites pour les fluides à une seule phase.

Hord, J., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Explosion Criteria for Liquid Hydrogen Test Facilities, NBS Report 10734, U-227, février 1972.

On passe en revue les méthodes actuelles d'évaluation des dangers pouvant porter atteinte à la sécurité du personnel des installations d'essais à l'hydrogène. On étudie les données relatives aux explosions des mélanges hydrogène-air. Comme autres aspects étudiés, il y a les dangers reliés aux boules de feu et aux surpressions, ainsi que les dangers reliés aux débris projetés.

Hord, J., Is Hydrogen a Safe Fuel? International Journal of Hydrogen Energy, volume 3, pages 157-176, Pergamon Press, 1978.

On étudie les aspects de la sécurité reliés à l'hydrogène et on les compare à ceux du méthane et de l'essence. Comme base de comparaison, on fait appel aux propriétés chimiques et physiques des trois combustibles. Les aspects étudiés sont le danger d'incendie, les dommages d'incendies, les dangers d'explosion et les dommages des explosions.

Joint Army, Navy, NASA, Air Force, Propulsion Committee, Hazards Working Group, Hazards of Chemical Rockets and Propellants Handbook, volume III, Liquid Propellant Handling, Storage and Transportation, AD870259, mai 1972.

Ce document fournit des critères, des méthodes, des instructions, des précautions et des règles techniques relatifs à la sécurité dans le but d'aider à contrer les dangers reliés à la manutention, au stockage, au transport et à l'utilisation des combustibles de fusée liquides.

McCarty, R., Weber, L.A., U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Thermophysical Properties of Parahydrogen from the Freezing Liquid Line to 5000 R for Pressures to 10 000 Psia, NBS Technical Note 617, R-701, 1972.

Les tableaux traitent d'entropie, d'enthalpie, d'énergie interne, de masse volumique, de volume, de vitesse du son, de chaleur spécifique, de conductivité thermique, de viscosité, de coefficient de diffusion thermique, de nombre de Prandtl et de constante diélectrique pour 65 isobares. En outre, il y a des tableaux pour l'hydrogène liquide et la vapeur saturée, y compris les propriétés ci-dessus et la tension de surface.

McCarty, R.D., Hord, J., Roder, H.M. NG2263089, Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data), rapport final - NAS 24-25 81N33266, National Bureau of Standards, Boulder, CO, rapport PB81-211492 NBS-MN-168 L00800600195 Disponible: NTIS, 525 pages, HC A22/MF A01.

Des données de recherche sur les propriétés de l'hydrogène sont présentées. On donne les propriétés thermophysiques de l'hydrogène liquide, en phase liquide-vapeur, en phase vapeur et gazeux ainsi que les propriétés en phase solide. On traite des modifications ortho-para de la molécule d'hydrogène et des variations de propriétés qui accompagnent ces modifications. On a recueilli des données de combustion et données relatives à la sécurité pouvant être utiles pour l'analyse des dangers reliés aux systèmes à hydrogène; diverses propriétés sont également présentées. Des données, des tableaux de données, des symboles, des unités et des facteurs de conversion sont également résumés.

McKinley, Clyde, Safe Handling of Hydrogen - EIX 80-12 02349, ACS Symp Ser N 116, Hydrogen: Prod. and Mark., basé sur un symposium du ACS. CSJ (Am. Chem. Soc./Chem. Society of Japan) Chem. Congress, Honolulu, Hawaii. Publié par ACS, Washington DC, 1980.

On résume les propriétés physiques/chimiques de l'hydrogène qui sont à l'origine des dangers de manutention. Comme dangers spécifiques, il y a les incendies et explosions reliés à l'hydrogène gazeux, les explosions reliées à l'hydrogène liquide, les "brûlures à froid", la fragilisation des systèmes de manutention exposés aux basses températures, la rupture de l'équipement par évaporation de l'hydrogène liquide qu'il contient et les atmosphères déficients en oxygène et impropres à la respiration. On fournit des critères qui permettent d'étudier les règles d'exécution en fonction des dangers et de contrôler ou éviter ces dangers.

Reider, R., Edeskuty, F.J., Hydrogen Safety Problems - NAS 14-44 77A33402, 1st World Hydrogen Energy Conference, Miami Beach, Fla., 1-3 mars 1976, compte-rendu, volume 3. (A77-33326 14-44) Coral Gables, Fla. Corp. Auth-California, University, Los Alamos, N. Mex.

On discute des situations dangereuses en termes d'impuretés. On traite des caractéristiques de combustion de l'hydrogène, de l'asphyxie et des déflagrations hydrogène-air en espaces ouverts et fermés. Il est question des effets de l'hydrogène cryogénique en fonction de l'augmentation de pression, de la condensation, de l'enrichissement en oxygène et des blessures dues au froid

U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Thermophysical Properties Division, Répertoire des publications, supplément no 1, septembre 1977 à octobre 1978.

U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Thermophysical Properties Division, Répertoire des publications, supplément no 2, novembre 1978 à octobre 1979.

U.S.Department of Commerce, National Bureau of Standards, Thermophysical Properties Division, Répertoire des publications, supplément no 3, novembre 1979 à décembre 1980.

U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Thermophysical Properties Division, Répertoire des publications, supplément no 4, janvier 1981 à avril 1982.

Voth, R.O., Safety of Hydrogen Pressure Gauges, Advances in Cryogenic Engineering, F-2, volume 17, Plenum Press, New York, 1972.

On discute d'une étude sur l'aspect sécurité des divers modèles de boîtiers de jauges pour les systèmes à hydrogène gazeux haute pression. Les dommages reliés aux incendies et aux débris résultant d'une rupture de jauge ont été étudiés en fonction de la sécurité du personnel.

Weintraub, A.A., United States Atomic Energy Commission, Control of Liquid Hydrogen Hazards at Experimental Facilities: A Review, HASL-160, mai 1965.

On discute des propriétés de l'hydrogène en fonction de matériaux identifiés pour les systèmes à hydrogène liquide. On traite des dangers reliés à l'hydrogène liquide des installations expérimentales et des techniques de contrôle pertinentes.

Zabetakis, M.G., Burgess, D.S., research on the Hazards Associated with the Production and Handling of Liquid Hydrogen, rapport d'études 5707, United States department of the Interior, Bureau of Mines, 1960.

On décrit les résultats théoriques et expérimentaux d'études reliées à la manutention d'hydrogène liquide. Les conclusions et les recommendations portent sur l'élimination des dangers reliés à (i) la formation de mélanges sensibles aux chocs oxygène solide/hydrogène liquide condensé et (ii) aux incendies.

Zabetakis, M.G., Safety with Cryogenic Fluids, The International Cryogenics Monographic Series, éd. généraux, Dr. K. Mendelssohn, Dr. K.D. Timmerhaus, Plenum Press, 1967.

Nous faisons référence ici au chapitre 2, Physiological Hazards. Comme dangers traités, il y a ceux qui sont reliés aux contacts entre l'humain et les fluides cryogéniques et leurs vapeurs. Ces dangers sont répertoriés sous les noms d'engelure, de maladies respiratoires et d'effets divers.

Zalosh, R.G., Factory Mutual Research Corporation, Comparative Analysis of Hydrogen Fire and Explosion Incidents, Quarterly Report No. 1, préparé pour la Division of Operational and Environmental Safety, U.S. Department of Energy, COO-4442-1, décembre 1977.

Il s'agit du premier d'une série de rapports qui traitent d'une analyse comparative des incidents ayant porté atteinte à la sécurité pour l'hydrogène

et le gaz naturel, qui identifient les aspects sécuritaires de l'hydrogène, qui proposent de nouvelles activités de recherche et des modifications aux codes et normes et qui évaluent de façon quantitative les dangers relatifs d'autres modes de stockage, de transport, d'utilisation et d'élimination de l'hydrogène. Dans le rapport en question, on discute des sources de données d'accidents reliés au gaz naturel et à l'hydrogène.

Systèmes cryogéniques

Faure, A., Les problèmes de sécurité reliés à l'utilisation de l'hydrogène liquide - NAS 06-31 78A18858, Atelier international sur l'hydrogène et ses perspectives d'avenir, Liège, Belgique, 15-18 novembre, 1976, compte-rendu, volume 2. Corp. Auth-L'Air liquide, Paris, France.

On traite des dangers de combustion et dangers cryogéniques reliés à l'utilisation de l'hydrogène liquide. Comme dangers cryogéniques, il y a la contamination par l'air condensé, les pression excessives, les dommages aux matériaux exposés à des contacts et la destruction des tissus humains. On traite de moyens permettant d'éviter la formation de mélanges inflammables dans les contenants d'hydrogène liquide ou dans l'atmosphère et d'éviter les sources d'inflammation. Il est question de mesures préventives pour les emplacements de stockage et de méthodes de lutte contre les incendies d'hydrogène.

Frizen, D.J., Mondenhall, J.R., National Bureau of Standards, Publications and Services of the Cryogenics Division, National Bureau of Standards 1953-1977, NBS Technical Note 1005, avril 1978.

On donne un répertoire des publications et des services de la Cryogenics Division, ainsi que les noms des auteurs et les index de sujets pour la période s'échelonnant de 1953 à 1977. En outre, il y a une énumération des propriétés thermodynamiques connues, de graphiques, de bibliographies et de rapports divers dans le domaine de la cryogénie.

Makeev, V.I., Pleshakov, V.F., Chugev, A.P., Fizika Goreniia I Vzeyva, Formation and combustion of hydrogen-air mixtures during liquid hydrogen evaporation into the atmosphere - NAS 05-25 82A16266, vol. 17, sept.-oct. 1981, p 14-21. En russe.

On a mesuré des concentrations et des températures au cours de l'évaporation de l'hydrogène liquide dans des conditions stationnaires. On a établi une relation entre les excès d'enthalpies et les concentrations massiques correspondant aux conditions de mélange turbulent libre. On a établi des relations empiriques qui permettent le coefficient de mélange turbulent au nombre de Reynolds. On a déterminé les étendues des zones de concentrations pouvant entraîner des dangers d'explosion ou d'incendie.

Safety panel of the British Cryogenics Council, Cryogenics Safety Manual, A Guide to Good Practice, seconde édition, Mechanical Engineering Publication Ltd, London, 1982.

On vise à donner des conseils aux personnes qui s'occupent de l'exploitation, de l'entretien et de la surveillance des installations de production, de stockage et de manutention de gaz commerciaux aux températures cryogéniques. On traite de santé, de sécurité et de contrôle des dangers.

Timmerhaus, K.D., Flynn, T.M., Safety with Cryogenic Systems, R-2, Advances in Cryogenic Engineering, compte-rendu, Cryogenic Engineering Cont., volume 23, Plenum Press, New York, 1978.

On offre un résumé et on traite des caractéristiques et des modes de contrôle des dangers reliés aux systèmes cryogéniques, comme les dangers pouvant affecter les substances physiologiques et la construction, l'inflammabilité et l'explosion et les dangers associés aux gaz à haute pression. On traite brièvement des grands principes de sécurité.

Sécurité et types d'application

Bain, A.L., NASA Space Program Experience in Hydrogen Transportation and Handling, Int. J. Hydrogen Energy, vol. 1, p 173-188, Pergamon Press, 1976.

On traite de l'expérience acquise en transport et manutention d'hydrogène à l'occasion du programme de lancements Apollo. On discute des types de systèmes de manutention d'hydrogène, des mesures de sécurité, des techniques d'exploitation et de l'expérience globale acquise au cours des années.

Brewer, G.D., Some environmental and safety aspects of using hydrogen as a fuel - NAS 07-44 79A20774 (Commission des communautés européennes, cours de l'Euratom, Ispra, Italie, 9-13 mai 1977), International Journal of Hydrogen Energy, vol. 3, 11 décembre 1978, p 461-474. Corp. Auth. Lockheed-California Co., Burbank, Calif.

On traite de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant des véhicules circulant sur les voies publiques et avions, en fonction de la sécurité et de la protection de l'environnement. On décrit la façon d'utiliser l'hydrogène à des fins de procédés industriels et on examine la possibilité d'utiliser l'hydrogène pour le transfert d'énergie et pour les appareils domestiques. On étudie le problème de la pollution de l'air par les avions.

Corneil, H.G., Heinzelmann, F.J., Nicholson, E.W.S., Exxon Research and Engineering Co., Hydrogen in Oil Refinery Operations.

Décrit les utilisations de l'hydrogène pour le raffinage du pétrole, les exigences anticipées pour l'hydrogène, les prix futurs de l'énergie et les aspects économiques de la production d'hydrogène raffiné.

Edeskuty, F.J., Safety of liquid hydrogen in air transportation - NAS 07-31 80N16236, L4453961, Los Alamos Scientific Laboratory, N. Mex., contrat W-7405-ENG-36, rapport LA-UR-79-1416, CONF-790942-1. Disponible: NITS 18P. HC A02/MF A01.

On discute des facteurs et problèmes de sécurité reliés à l'utilisation de l'hydrogène liquide comme carburant pour avions.

Edeskuty, F.J., et al, Los Alamos Scientific Laboratory, Critical Review and Assessment of Problems in Hydrogen Energy Delivery Systems, rapport initial, août 1978, LA-7405-PR.

Traite des aspects pouvant présenter des problèmes en matière de transport d'hydrogène en grandes quantités sur de longues distances. On se concentre sur le transport routier de l'hydrogène liquide et sur le transport par pipe-line de l'hydrogène gazeux. On discute d'analyse de risques, de fragilisation par l'hydrogène et des règlements et règles actuels.

Edeskuty, F.J., Shehan, N.N. et al, Los Alamos Scientific Laboratory, Critical Review and Assessment of Environmental and Safety Problems in Hydrogen Energy Systems, mai 1979, LA-7820-PR.

Etude et évaluation des problèmes de sécurité et d'environnement pouvant accompagner l'utilisation de l'hydrogène comme porteur d'énergie. On traite de sujets comme le transport d'hydrogène par pipe-line de transport de gaz, du transport de l'hydrogène liquide, de la fragilisation par l'hydrogène, des codes, normes et règlements, et de questions d'environnement.

Escher, W.J.D., Escher Technology Associates, Survey of Liquid Hydrogen Container Techniques for Highway Vehicle Fuel System Applications, préparé pour le U.S. Department of Energy, novembre 1978.

On traite des différents projets de stockage d'hydrogène liquide à bord des véhicules routiers, à l'échelle mondiale. On évalue quatre systèmes de récipient d'hydrogène cryogénique pouvant être utilisés dans des véhicules routiers. Les détails de ces systèmes sont présentés en tant que base de données pour travaux futurs dans le domaine.

Kelley, J.H., Hagler, R., Storage, Transmission and Distribution of Hydrogen, Int. J. of Hydrogen Energy, vol. 5, p 35-54, Pergamon Press Ltd, 1980.

Les méthodes actuelles et exigences futures pour le stockage, le transfert et la distribution de l'hydrogène sont traitées et analysées afin d'identifier les déficiences à corriger en vue de pouvoir utiliser pleinement l'hydrogène comme combustible.

McHugh, Manus III, Hydrogen distribution safety - EIX 80-12 02351, ACS symp. ser. N 116, hydrogen: Prod. and Mark., basé sur un symposium du ACS/CSJ (Am. Chem. Soc./Chem. Society of Japan) Chem. Congr., Honolulu, Hawaii. 2-6 avril 1979. Publié par ACS, Washington, DC, 1980, p 253-275.

L'industrie a un excellent dossier en matière de sécurité, pour le transport de l'hydrogène liquide. On discute des facteurs de sécurité relatifs à la construction des remorques. Pour faciliter la compréhension, on se réfère aux remorques et à l'équipement de produits dérivés de l'air pour illustrer les mesures préventives relatives à la distribution sécuritaire de l'hydrogène liquide.

Milier, M., Safe Handling of Hydrogen in Large Quantities, Proc. International Symposium, Hydrogen in Air Transportation, septembre 1979, Stuttgart, RFA.

Traite de la manutention sécuritaire de l'hydrogène utilisé comme combustible de fusée. Il est question de systèmes d'alimentation et d'approvisionnement, de transport et de manutention, de mesures preventives, d'incidents et d'exigences de laboratoire spécifiques.

Mueller, M., Safe handling of hydrogen in large quantities - NAS 15-28 80A37337. Hydrogen in Air Transportation Proceedings of the International Symposium, Stuttgart, RFA, 11-14 septembre 1979. (A80-37330 15-44) Corp Auth. - Messerschmitt-Boelkow-Blohm Gmbh, Ottobrunn, RFA.

On traite de la manutention sécuritaire de l'hydrogène utilisé comme combustible de fusée. On décrit plusieurs accidents causés par des fuites d'hydrogène, ainsi que des explosions et des défaillances d'appareils électroniques menant à des accidents.

Nezer, C., La sécurité relative aux installations de transport et de stockage de l'hydrogène - NAS 06-31 78A18856, Nezer, C., Atelier international sur l'hydrogène et ses perspectives d'avenir, Liège, Belgique, 15-18 novembre 1976, compte-rendu. Volume 2. (A78-18826 06-44). En français, Corp. Auth.-Association Vincotte, Bruxelles, Belgique.

On traite des propriétés de l'hydrogène gazeux et liquide et des mesures de sécurité relatives à la manutention de l'hydrogène. On discute des méthodes qui permettent d'éviter la formation et l'inflammation des mélanges

hydrogène-air; celles-ci comportent l'évacuation de l'équipement, la suppression et le repérage des agents de contamination et l'élimination des étincelles d'origine électrique. On traite de la possibilité de stocker l'hydrogène gazeux dans des cavernes souterraines.

Rieder, R., Edeskuty, F.J., Hydrogen Safety Problems, International J. Hydrogen Energy, Pergamon Press, 1979.

Traite de situations dangereuses et d'incidents relatifs à l'hydrogène gazeux et cryogénique utilisé comme combustible.

Institut des systèmes à hydrogène, Thermochemical Technologies Division, Hydrogen Safety in the Research and Development Environment, octobre 1984. Rapport IHS-84-19, préparé pour l'Ontario Ministry of Energy.

Youngblood, W.W., Safety Criteria for the Operation of Gaseous Hydrogen Pipelines. Rapport final - NAS 03-31 86N12392. Wyle Labs Inc., Huntsville, Ala. Contrat DTRS56-81-C-00043. Rapport PB85-206159 WR-84-24 RSPA/DMT 10-85/1. Disponible NTIS HC A05/MF A01.

Traite des critères de sécurité pour le transport de l'hydrogène gazeux par pipe-line. On insiste sur le transport par pipe-lines, mais on traite également de la distribution par pipe-lines. On arrive à la conclusion que dans certaines conditions, l'hydrogène gazeux pourrait être à l'origine de dangers pour le public et que les codes et règlements de sécurité actuels ne s'attaquent pas vraiment à ces dangers possibles.

Zalosh, R.G., Bajpai, S.N., Hydrogen Microscopic Hazard Evaluation - NAS 15-44 82N24706.

On fait état des progrès d'une méthode d'évaluation préliminaire des dangers relatifs aux microsphères de verre évidées pour le transport et le stockage de l'hydrogène. On évalue l'inflammabilité et les risques d'explosion de microsphères modèles pleines d'hydrogène. On passe également en revue les codes et règlements officiels de sécurité relatifs aux microsphères remplies d'hydrogène.

Etudes sur les dangers

Bollinger, L.E., Fong, M.C., Laughrey, J.A., Edse, R., Experimental and Theoretical Studies on the Formation of Detonation Waves in Variable Geometry Tubes, NASA Technical Note D-1983, juin 1963.

Il s'agit de l'étude des distances d'induction de détonation obtenues expérimentalement pour des mélanges hydrogène/oxygène à 45, 66,67 et 75% d'hydrogène et des pressions initiales de 1 et 5 atmosphères dans un tube de détonation à géométrie interne variable.

Jacobs, R.B., Buckley, W.L., Rhodes, J.C., Speer, T.L., Standard Oil Company, The Destruction of a Large Refining Unit by Gaseous Detonation, Chemical Engineering Progress, volume 53, no 12, décembre 1957.

Il s'agit de la description d'explosions qui sont survenues dans une chambre de réaction et séparateur haute pression à Whiting, Indiana. On traite également des dommages qui ont été causés. L'incident a été causé par un mélange inflammable d'oxygène gazeux et de naphte.

Kuchta, J.M., Cato, R.J., Martindill, G.H., Gilbert, W.H., Ignition Characteristics of Fuels and Lubricants, Bureau of Mines Technical Report AFAPL-TR-66-21, mars 1966.

On présente un résumé technique de travaux effectués au cours d'une étude de trois ans sur les caractéristiques d'inflammation, d'inflammabilité et d'oxydation d'hydrocarbures combustibles dans diverses atmosphères azote-oxygène.

Ordin, P.M., Review of hydrogen accidents and incidents in NASA operations - NAS 01-44 75A10539, 9th Intersociety energy conversion engineering conference, San Francisco, Calif., 26-30 août 1974. Coompte-rendu, Corp. Auth - NASA, Lewis Research Centre, Cleveland, Ohio.

On étudie la sécurité en tant qu'important facteur de développement d'une économie d'énergie basée sur l'hydrogène produit par l'électrolyse de l'eau alimentée par énergie nucléaire ou solaire, en termes des problèmes de sécurité relatifs à la production, à la manutention, au transport et à l'utilisation de l'hydrogène liquide et gazeux. Ces problèmes sont passés en revue à partir des dossiers d'accidents et d'incidents qui sont survenus

dans le cadre du développement et de l'exploitation des systèmes d'énergie et de propulsion de la NASA. On propose des domaines de recherche et de développement en vue d'accroître la sécurité et développer des techniques qui permettront d'atténuer les conséquences des divers accidents.

Randall, P.N., Blans, J., Dudley, W.M., Jacobs, R.B., Effects of Gaseous Detonations upon Vessels and Piping, Chemical Engineering Progress, vol. 53, no 12, décembre 1957.

On discute des travaux effectués dans le cadre de l'étude d'une explosion qui a détruit une raffinerie à Whiting, Indiana. On traite des principes sousjacents à la rupture de conduites et de contenants par une détonation de gaz et on fournit des données techniques et métallurgiques pertinentes concernant l'explosion.

Sherman, M.P., Hydrogen flame acceleration and transition to detonation - ERDA 8412-012829, 12th Water reactor safety research information meeting, Gaithersburg, Md, USA, 23 octobre 1984. Date: 1984, rapport Sand--84-20780, corp. Sandia National Labs, Albuquerque, NM (USA).

On traite des résultats obtenus à l'aide de deux grandes installations expérimentales érigées aux Sandia National Laboratories d'Albuquerque, NM.

Stewart, R.D., Aerospace Safety Research and Data Institute, NASA Lewis Research Centre, A Method for Defining Down-Wind Evacuation Areas for Transportation Accidents Involving Toxic Propellant Spills, NASA TM X-68188, 1972.

On définit les régions d'évacuation relatives aux déversements accidentels de combustibles pour fusée toxiques le long des voies ferrées et des routes utilisées pour le transport. Ces régions sont déterminées à partir des plus récentes valeurs de taux d'évaporation de combustibles pour fusée pour diverses régions de déversement.

Strehlow et al., University of Illinois, The Characterization and Evaluation of Accidental Explosions, préparé pour le NASA Lewis Research Centre, NASA CR 134779, juin 1975.

Etude détaillée des connaissances actuelles en matière d'explosions accidentelles. Les explosions sont caractérisées par leur type et on traite de leurs caractéristiques.

Varpie, M., Wolfhord, H.G., United States Bureau of Mines, Ignition by Hot Gases, BUM-30-R, août 1960.

Etude du facteur affectant l'inflammation des mélanges gazeux explosifs par des jets de gaz chauds. On décrit la méthode expérimentale et on donne des résultats comme l'influence du diamètre du jet, la température du jet et la durée de contact, ainsi que diverses observations.

Windgassen, K.F., Kesten, M., Investigation of the hydrogen susceptibility of steels used for the storage and transportation of gaseous hydrogen. Comparison of different testing methods - ERDA 8403-602917, date 1983, rapport EUR-8690-DE, en allemand. Disponible: Commission des communautés européennes, Luxembourg.

On traite de travaux effectués dans le cadre d'un projet de recherche conjoint entrepris par trois firmes: l'Air liquide, Hoechst et Messer Griesheim. L'objectif général était d'étudier la susceptibilité de l'hydrogène d'aciers de réservoirs sous pression courants afin de les caractériser et de s'assurer de leur utilisation sécuritaire et économique pour l'hydrogène gazeux à haute pression. Le but précis des activités de recherche qui sont décrites était d'obtenir des données fondamentales sur la condition critique nécessaire à l'apparition de fissures de fatigue causées par l'hydrogène aux divers défauts de surface.

Zalosh, R.G., Short, T.P., Compilation and analysis of hydrogen accident reports. Final Technical report - USGCOO-4442-4, Corp. source - Factory Mutual Research Corp., Norwood, MA. Journal Vol. - U7925 N0400, date de rapport: octobre 1978.

Plus de 400 relevés d'accidents reliés à l'hydrogène ont été recueillis d'une variété de sources, y compris de compagnies d'assurance, d'organismes gouvernementaux, d'associations commerciales, d'associations de protection contre les incendies et de compagnies individuelles utilisant l'hydrogène. De 1965 à 1977, la plupart des accidents sont survenus dans des

milieux industriels. On présente l'historique de cas représentatifs et des tableaux de données en fonction des causes et des facteurs pertinents. Les données indiquent que les explosions reliées à l'hydrogène ont constitué un problème plus sérieux que les autres types d'accidents reliés à l'hydrogène, en termes de nombres d'incidents et blessures ou pertes de vie et de dommages à la propriété. Plusieurs explosions découlaient d'accumulations d'hydrogène non détectées causées par des fuites, des évacuations incomplètes, une mauvaise ventilation et des systèmes d'échappement bouchés. Les données sur les accidents indiquent que la différence d'inflammabilité entre l'hydrogène et les combustibles classiques exige que l'on établisse des mesures préventives spéciales contre l'incendie et l'explosion. On émet des recommandations en vue d'améliorer la technologie de la protection contre les incendies/explosions reliés à l'hydrogène, en ce qui a trait à la détection de l'hydrogène, aux dispositifs de détente à grande vitesse pour les urgences et à l'aérage contre les explosions. (Réf. ERA 04:042500).